

**AVANCES TECNOLÓGICOS EN CELDAS SOLARES: TIPOS DE JUNTURA
Y TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN**

ERIKA TATIANA MATEUS GALINDO

DAYSY LILIANA MERCHÁN CAÑÓN



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES**

2017

**AVANCES TECNOLÓGICOS EN CELDAS SOLARES: TIPOS DE JUNTURA
Y TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN**

**ERIKA TATIANA MATEUS GALINDO
DAYSY LILIANA MERCHÁN CAÑÓN**

Trabajo de Grado para optar al título de:

Ingenieras Electricistas

Directora:

MÓNICA ANDREA BOTERO LONDOÑO

Doctora En Ciencias - Física

Co-Directora:

MARÍA ALEJANDRA MANTILLA VILLALOBOS

Doctora en Ingeniería

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES**

2017

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirnos alcanzar esta meta, a nuestras familias por su amor apoyo incondicional y acompañarnos en este camino. A la profesora Mónica Andrea Botero y la profesora María Alejandra Mantilla quienes con su experiencia nos orientaron en el desarrollo de este proyecto.

Infinitas gracias,

DEDICATORIA

A mi madre Olisbe Galindo quien con su paciencia y amor me dio motivos para continuar y no desfallecer.

A mi padre Alirio Mateus quien con sus consejos y carácter siempre ha sido un modelo de ternura y dedicación, demostrándome que todo esfuerzo en la vida es bien recompensado.

A mi abuela Ana María Noguera, más que una abuela se convirtió en una segunda madre quien con sus experiencias de vida y consejos me motivaron a seguir a adelante.

A mis hermanos Leonardo y Royer por su compañía, alegrías y apoyo.

A mis tíos Analisbeth Galindo, Indalesia Galindo y Sebastián Mendoza quienes siempre fueron mis confidentes y me dieron el aliento para poder alcanzar uno de mis grandes sueños.

A Héctor Manuel, compañero de guerra, más que un amigo se convirtió en un hermano quien nunca me dejó de lado y estuvo siempre incondicional para mí.

A mi compañera de tesis Daysy Liliana Merchán por su compañía y sobretodo paciencia durante el desarrollo del proyecto.

Erika Tatiana Mateus Galindo

DEDICATORIA

A mi familia que con su amor y apoyo me motivaron a realizar este sueño, especialmente a mí gorda quien con su esfuerzo, perseverancia y cariño me enseñó a luchar.

A mi hermosa Sarah que es, ha sido y será mi motivo para levantarme cada día de mi vida

A todas las personas que durante este tiempo me acompañaron algunas desde la distancia siempre apoyaron y creyeron en mí.

Gracias

Daysy Liliana Merchán Cañón

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
JUSTIFICACIÓN	20
OBJETIVOS	22
OBJETIVO GENERAL.....	22
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
1. MARCO REFERENCIAL	23
1.1 ENERGÍA SOLAR	23
1.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	23
2. ANTECEDENTES.....	25
3. CELDA SOLAR Y ESTRUCTURA.....	30
3.1. CONCEPTOS BÁSICOS.....	30
3.1.1 Pasivación.	30
3.1.2 Límite shockley- queisser	30
3.1.3 Oxido conductor trasparente (TCO).....	30
3.1.4 Capa de agotamiento	30
3.1.5 Corriente de arrastre.....	30
3.1.6 Afinidad electrónica:.....	30
3.1.7 Corriente de difusión.....	30
3.1.8 Efecto hall.....	31
3.1.9 Brecha de energía prohibida (bandgap)	31
3.1.10 Nivel de vacio E_{vac}	31
3.1.11 Banda de valencia	31
3.1.12 Banda de conducción.....	31
3.1.13 Nivel de fermi.....	31
3. 2 FUNCIONAMIENTO DE LA CELDA	31
4. CLASIFICACIÓN DE LAS CELDAS SOLARES SEGÚN EL TIPO DE JUNTURA ...	37
4.1 HOMOJUNTURA	37
4.2 HETEROJUNTURA.....	43
4.2.1 PJH " <i>planar heterojunction</i> "	44
4.2.2. BJH " <i>bulk heterojunction</i> "	44
4.2.3 HIT " <i>heterojunction with intrinsic thin layer</i> ".....	45

4.3 “BURIED HOMOJUNCTION”	47
4.4 UNIONES METAL-SEMICONDUCTOR (BARRERA SCHOTTKY)	49
4.4.1 Celdas solares PbS nanocrystal schottky	52
4.5 JUNTURA TIPO p-i-n	54
4.5.1 Silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H).	55
4.5.2 “Back point contact” (BPC)	56
4.5.3 Telurio de cadmio (CdTe)	57
4.6 UNIONES ELECTROLITO-SEMICONDUCTOR	57
4.7 MULTIJUNTURA O CELDAS TANDEM	59
4.7.1 Celdas apiladas mecánicamente	61
4.7.2 Celdas de estructura monolítica baja resistencia.	63
4.7.3 Apilamiento mecánico de celdas monolíticas:	63
5. GENERACIONES PROPUESTAS POR MARTIN GREEN	64
5.1 PRIMERA GENERACIÓN	64
5.1.1 Silicio monocristalinos	65
5.1.2 Silicio policristalino]	65
5.1.3 Ribbon	66
5.2 SEGUNDA GENERACION	66
5.2.1 Silicio amorfo (a-Si)	67
5.2.2 Telurio de cadmio (CdTe)	68
5.2.3 CIGS (Cobre, Indio, Galio Selenio/Azufre)	69
5.2.4 Kesteritas	70
5.3 TERCERA GENERACIÓN	71
5.3.1 Celdas sensibilizadas (TiO ₂)	72
5.3.2 Celdas orgánicas	73
5.3.3 Celdas inorgánicas:	74
5.3.4 Híbridos perovskita.	74
6. CONCLUSIONES	77
REFERENCIAS	79
BIBLIOGRAFÍA	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Capacidad mundial instalada y sus adiciones durante el año 2.015.	17
Figura 2. Niveles de irradiación solar en Colombia.....	19
Figura 3. Primer módulo comercial de silicio producido por laboratorios Bell ...	27
Figura 4. Estructura de una celda solar Homojuntura.....	32
Figura 5. Grafica de eficiencia versus nivel de energía bandgap	36
Figura 6. Diagrama de banda de una celda tipo Homojuntura.....	38
Figura 7. Esquema de una celda tipo Homojuntura	39
Figura 8 . Esquema de una celda PERL.....	41
Figura 9. Celda solar tipo PERT	42
Figura 10. Diagrama de banda Heterojuntura.....	43
Figura 11. Configuraciones celdas solares tipo a) <i>Planar Heterojunction</i> (PHJ) b) Bulk Heterojunction (BJH)	44
Figura 12 . Estructura de celda solar tipo HIT [68].....	46
Figura 13 . Celda sola tipo " <i>Buried Contact</i> "	47
Figura 14. Diagrama de banda de energía " <i>Buried Contact</i> "	48
Figura 15. Diagrama de bandas para la unión metal-semiconductor	50
Figura 16. Esquema del dispositivo fotovoltaico con capa nanocristal PbS...53	
Figura 17. Diagrama de banda de a) unión p-n b) unión p-i-n	54
Figura 18. Celda solar back point contact (BPC).	56
Figura 19 . Unión n-i-p telurio de cadmio (CdTe).....	57
Figura 20. Dispositivo básico para la fabricación de una celda electroquímica	58
Figura 21. Estructura básica con Multijuntura	60
Figura 22. Diagrama de una celda solar apilada mecánicamente GaAs-GaSb con doble unión.....	61
Figura 23. Configuración de una celda GaAs / CIS apilada mecánicamente ..	62
Figura 24. Estructura Kesterita $Cu_2ZnSn(S/Se)_4$	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Procesos de transporte eléctrico en celdas solares	33
Tabla 2. Relación materiales usados para la fabricación de celdas solares con sus respectivos brechas de energía prohibida.....	35
Tabla 3. Mejores eficiencias Homojunturas	40
Tabla 4. Propiedades de la celda HIT con mayor eficiencia.....	47
Tabla 5. Mejores eficiencias Buried Contact.....	49
Tabla 6. Funciones de trabajo de principales elementos para uso en celdas solares	51
Tabla 7. Avances en celdas con Multijuntura	60
Tabla 8. Primera Generación.....	66
Tabla 9. Segunda Generación.....	71
Tabla 10. Configuraciones y principales características para los diferentes compuestos en celdas solares de perovskita	75
Tabla 11. Tercera Generación.....	76

RESUMEN

TÍTULO: AVANCES TECNOLÓGICOS EN CELDAS SOLARES: TIPOS DE JUNTURA Y TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN

AUTOR: Mateus Galindo, Erika Tatiana, Merchán Cañón, Daysy Liliana**

PALABRAS CLAVE: Junturas, celdas solares, eficiencia, materiales, Silicio, generaciones, homojuntura, heterojuntura.

DESCRIPCIÓN:

La mayor parte de la energía eléctrica proviene de combustibles fósiles, los cuales liberan al ambiente grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2), razón por la cual en los últimos años se ha dado un gran interés en nuevas formas para la generación de energía limpias y amigables con el ambiente.

Una alternativa es la energía solar, la cual, hace uso de celdas solares que son dispositivos fabricados para convertir luz del sol directamente en energía eléctrica, mediante un fenómeno físico denominado efecto fotovoltaico. Para que esto se lleve a cabo, la celda solar debe elaborarse con ciertos tipos de materiales, de manera que cuando se expone a la luz, ésta logre ser absorbida en su mayoría. Si bien el número de materiales que son capaces de exhibir características fotovoltaicas es grande, el número de tales materiales que son capaces de hacer la transformación de la radiación solar en energía eléctrica con alta eficiencia son pocos.

Actualmente existen diversas tecnologías de fabricación de celdas solares, producto de investigaciones y estudios orientados a la obtención de celdas con mayores eficiencias y costos más bajos. En este trabajo se encuentra las principales definiciones, estructuras, técnicas más sobresalientes y la implementación de nuevos conceptos en materiales que podría convertirse en

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Ing. Mónica Andrea Botero L. Codirectora: Ing. María Alejandra Mantilla Villalobos.

una alternativa innovadora, para esto tomaron como base libros y publicaciones sobre el estado actual de las distintas tecnologías desde dos perspectivas juntas y generaciones propuestas por Martin Green.

ABSTRACT

TITLE: TECHNOLOGICAL ADVANCES IN SOLAR CELLS: TYPES OF JUNCTIONS AND FABRICATION TECHNOLOGIES

AUTHOR: Mateus Galindo, Erika Tatiana, Merchán Cañón, Daysy Liliana **

KEYWORDS: Junctions, solar cells, efficiency, materials, Silicon, generations, homojunction, heterojunction.

DESCRIPTION:

The most part of the electrical energy comes from fossil fuels, which release large amounts of carbon dioxide (CO₂) into the atmosphere, which is why in recent years there has been a great deal of interest in new forms of clean energy generation and friendly with the environment.

An alternative is solar energy, which makes use of solar cells that are devices manufactured to convert sunlight directly into electrical energy, through a physical phenomenon called photovoltaic effect. For this to be done, the solar cell must be made with certain types of materials, so that when exposed to light, it can be absorbed mostly. While the number of materials that are capable of exhibiting photovoltaic characteristics is great, the number of such materials that are capable of making the transformation of solar radiation into electrical energy with high efficiency are few.

Actually there are several technologies for the manufacture of solar cells, a product of research and studies aimed at obtaining cells with higher efficiencies and lower costs.

In this work we find the main definitions, structures, most outstanding techniques and the implementation of new concepts in materials that could

become an innovative alternative, based on books and publications on the current state of the different technologies from two perspectives joints And generations proposed by Martin Green.

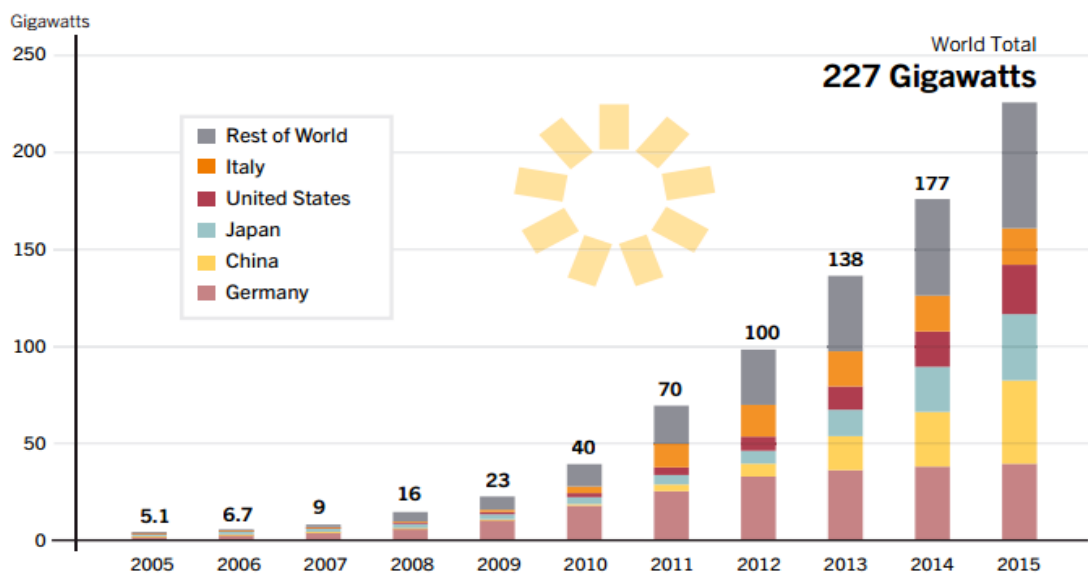
INTRODUCCIÓN

El año 2015 fue un año extraordinario para las energías renovables, con los mayores aumentos de la capacidad mundial observados hasta ahora, a pesar de esto persisten los desafíos, en particular en el sector de la energía.

En el año se percibieron varios acontecimientos que tienen una influencia sobre la energía renovable; además, un crecimiento en la investigación y desarrollo de nuevos materiales y tecnologías capaces de generar energía de maneras más eficientes [1].

La energía solar fotovoltaica, ha logrado una transformación acelerada en el sector eléctrico experimentando su mayor incremento anual en capacidad instalada de la historia; teniendo un aumento del 25% respecto a un record de 50 GW, para un crecimiento total mundial de 227 GW (ver figura 1), algunos países como China, Japón y Estados Unidos representaron la mayor parte de capacidad añadida; permitiendo una recuperación y un fortalecimiento en la industria, debido a la aparición de nuevos mercados y una fuerte demanda mundial [2].

Figura 1. Capacidad mundial instalada y sus adiciones durante el año 2.015 [1]



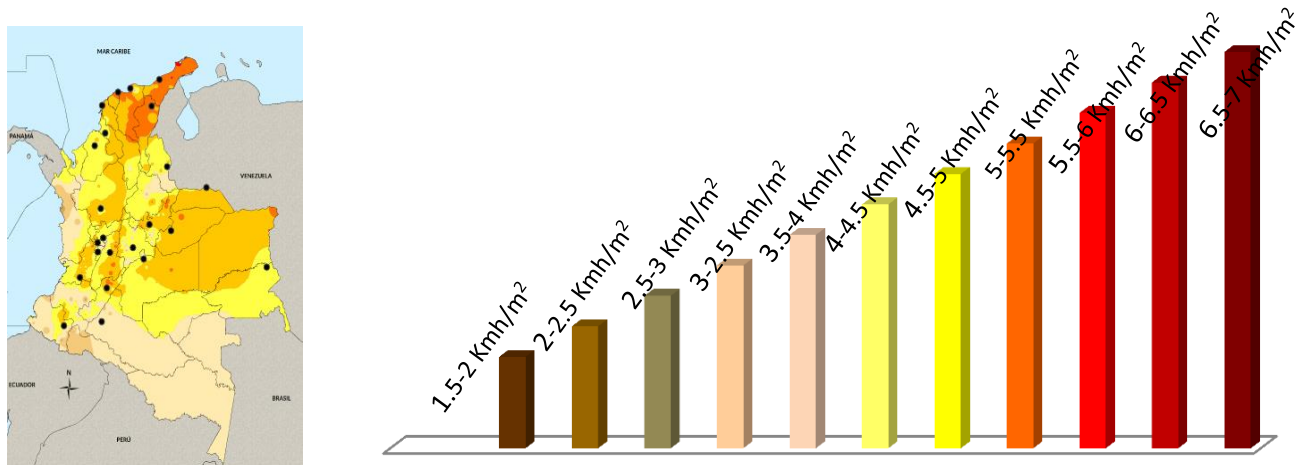
La expansión en el mercado mundial se debe en gran parte a la creciente competitividad de la energía solar fotovoltaica (FV), así como a los nuevos programas de gobierno, la creciente demanda de electricidad y a la concientización de muchos países de su potencial para hacer uso de la energía solar fotovoltaica como una alternativa para tratar de mitigar la contaminación y las emisiones de CO₂.

Las fuentes disponibles de información de recurso solar indican que el país cuenta con una irradiación promedio de 4,5 kWh/m²/d [3], la cual supera el promedio mundial de 3,9 kWh/m²/d, y está muy por encima del promedio recibido en Alemania (3,0 kWh/m²/d) [4], que es uno de los países que hacen mayor uso de la energía solar FV a nivel mundial, con aproximadamente 39.7GW de capacidad instalada a 2015.

Colombia, por su posición geográfica en el planeta, dentro de la zona tórrida y en la región Andina, cuenta con condiciones climáticas variadas y especiales que propician la disponibilidad del recurso solar, que representa una oportunidad de energía limpia para un desarrollo sostenible [5]. De acuerdo a la información de los entes encargados, tales como la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética), regiones particulares del país como La Guajira, una buena parte de la Costa Atlántica y otras regiones específicas en los departamentos de Arauca, Casanare, Vichada y Meta, entre otros, presentan niveles de radiación por encima del promedio nacional que pueden llegar al orden de los 6,0 kWh/m²/d, valor comparable con algunas de las regiones con mejor recurso en el mundo como es el caso del desierto de Atacama en Chile o los estados de Arizona y Nuevo México en Estados Unidos [6].

Como se observa en la figura 2 las zonas de color rojo, naranja y amarillo cuentan con altos niveles de irradiación, lo que revela el buen potencial energético solar en todo el territorio, con un promedio diario multianual cercano a 4,5 kWh/m², destacándose la península de la Guajira, con un valor promedio de 5.5 kWh/m² y la Orinoquia, con un valor un poco menor, propicio para un adecuado aprovechamiento.

Figura 2. Niveles de irradiación solar en Colombia [5]



Cabe recalcar que gran parte de la región atlántica no cuenta con una infraestructura eléctrica, debido principalmente a los altos costos de llevar la red eléctrica a lugares tan apartados. Partiendo de lo anterior, surge entonces la necesidad de desarrollar un mercado de oferta competitivo en materia de estándares de calidad, seguridad, servicio y bajos precios de instalación.

Teniendo en cuenta lo anterior, el aprovechamiento de los niveles de irradiación de estas zonas podría convertirse en una alternativa factible, mediante la utilización de sistemas fotovoltaicos, cuyo componente fundamental es el panel solar o módulo fotovoltaico. La estructura base de los módulos fotovoltaicos son las celdas solares, que son dispositivos que convierten la energía de la luz del sol en energía eléctrica en forma directa, sin la necesidad de piezas móviles o algún tipo de combustión.

Las celdas solares están elaboradas a base de materiales semiconductores. Actualmente se han convertido en tema para muchos científicos y entidades con el propósito de mejorar sus propiedades y eficiencias.

JUSTIFICACIÓN

En los últimos años, la energía solar fotovoltaica ha logrado marcar una diferencia gracias a los avances tecnológicos en el diseño y fabricación de celdas solares; continuamente se evidencia el surgimiento de nuevas tecnologías que han permitido generar una mayor eficiencia y una reducción en costos de elaboración.

La generación eléctrica en su mayor parte proviene de los combustibles fósiles, los cuales liberan al ambiente enormes cantidades de dióxido de carbono (CO₂) que es el principal causante de los gases de efecto invernadero y del daño a la capa de ozono. Por esta razón se ha vuelto una prioridad encontrar formas más eficientes y limpias de generar energía. Una buena iniciativa es el aprovechamiento de los recursos que provee el entorno tales como el sol, el viento e incluso el calor almacenado bajo la superficie terrestre, los cuales pueden ser transformados en energía eléctrica.

En Colombia el uso de la energía fotovoltaica tuvo sus inicios en los años 80 en un programa de Telecomunicaciones rurales de Telecom con la asistencia técnica de la Universidad Nacional; tiempo durante el cual se instalaron pequeños generadores fotovoltaicos de 60 Wp (vatio pico) para radioteléfonos rurales; así el programa continuó instalando estos sistemas y pronto se escaló a sistemas de 3 a 4 kWp para las antenas satelitales terrenas. Para 1983 ya se habían instalado 2950 sistemas [7].

En el año 2014 se promueve en Colombia la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional mediante la Ley 1715 [8], la cual establece en su Artículo 10 la creación de un Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (el FENOGE), destinado a financiar programas y proyectos en dichas áreas a partir de recursos aportados por la Nación, entidades públicas o privadas, y organismos de carácter multilateral e internacional. Es así como se evidencia que el país se está encaminado al uso e implementación de fuentes de energía no

convencionales, con el propósito de lograr un desarrollo económico sostenible, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y conseguir asegurar su capacidad de abastecimiento energético.

En el campo de la investigación en el área de fabricación de celdas solares, la Universidad Nacional de Colombia es pionera con el desarrollo de celdas solares tipo película delgada.

Por otro lado, la Universidad Industrial de Santander muestra su interés en el fortalecimiento de las líneas de investigación en materiales y fabricación de celdas solares. El semillero de investigación en materiales, energías renovables y desarrollos tecnológicos SIMART, se encuentra orientado al campo de los materiales y avances tecnológicos en celdas solares, entre sus propósitos está la fabricación de celdas solares diseñadas y construidas por talento UIS, razón por la cual se lleva a cabo la investigación y recopilación acerca del tipo de juntas y generaciones de fabricación de celdas solares. En este sentido, este proyecto de grado se enfoca en una revisión de las diferentes tecnologías de fabricación de celdas solares encontradas en la literatura científica y algunos avances.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio sobre las tecnologías de fabricación de celdas solares de acuerdo al tipo de junta y a las generaciones planteadas por Martin Green.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Llevar a cabo una búsqueda bibliográfica de artículos y textos referentes al estado actual de las tecnologías usadas en la fabricación de celdas solares.
- ✓ Realizar una clasificación de las celdas solares de acuerdo al tipo de junta.
- ✓ Realizar una clasificación de las celdas solares de acuerdo a la tecnología de generación propuesta por M. Green.
- ✓ Proporcionar un panorama acerca del estado actual de las tecnologías de fabricación de celdas solares basadas en los criterios mencionados anteriormente.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 ENERGÍA SOLAR

La energía solar hace referencia a la energía radiante que la tierra recibe del sol, razón por la cual este tipo de tecnología se convierte en una muy buena opción para su implementación y desarrollo, además de tener importantes ventajas sobre otros tipos de generación, como lo son su naturaleza inagotable, renovable y su bajo impacto ambiental. La radiación solar puede ser transformada en calor o directamente en electricidad, de manera que se obtienen dos tipos de energía, la energía solar térmica y la energía solar fotovoltaica.

En cuanto a la energía solar térmica, esta se obtiene cuando la energía solar es transformada en calor principalmente para el calentamiento de agua y espacios, a través de lo que se conoce como colectores de placa plana o calentadores solares.

Otras tecnologías de colectores solares, concentran la energía solar a fin de lograr altas temperaturas (llegando incluso a 3000°C) para la producción de vapor que puede ser usado directamente como calor útil en procesos industriales o para la producción de electricidad [9].

En Colombia, la energía solar térmica es usada en aplicaciones de uso doméstico, industrial y recreacional (calentamiento de agua para piscinas); y otras menos conocidas como el secado solar de productos agrícolas y la destilación solar de aguas no potables inclusive agua de mar [10].

1.2 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía limpia y renovable, que se obtiene directamente de la radiación solar. Para esto, hace uso de celdas solares que son dispositivos fabricados para convertir luz del sol directamente

en energía eléctrica, mediante el fenómeno físico denominado efecto fotovoltaico [11] [12]. El concepto básico es simple; La radiación solar ingresa a la unión de los semiconductores p-n y genera pares electrón – hueco, los cuales están disponibles para fluir a través de un circuito exterior y proporcionar potencia eléctrica [13].

La característica necesaria para el efecto fotovoltaico es la presencia de un campo eléctrico interno, por cualquier variedad de causas, tales como dopaje en las diferentes regiones, contactos, superficies, etc., el cual es el encargado de generar una separación de los electrones y los huecos liberados por los fotones, para que puedan circular fuera del material a un circuito exterior, antes de que se recombinen entre sí.

En un material fotovoltaico, cuando se expone a la luz, ésta puede ser absorbida por el material y a su vez tiene la capacidad de transformar la energía de los fotones de la luz incidente en energía eléctrica en forma de corriente y voltaje. Si bien el número de materiales que son capaces de exhibir características fotovoltaicas es grande, el número de tales materiales o dispositivos que son capaces de hacer la transformación de la radiación solar en energía eléctrica con alta eficiencia (>21%) son pocos, además deben cumplir con condiciones tales como bajos costos, y alta estabilidad en funcionamiento [14].

2. ANTECEDENTES

El desarrollo de las celdas fotovoltaicas tuvo su origen hace aproximadamente 177 años, cuando el físico francés Alexandre Edmond Becquerel en 1839, descubrió que una corriente eléctrica podría ser producida haciendo brillar un haz de luz sobre un electrodo en una solución electrolítica [15].

El ancestro directo de las celdas solares se originó en la última mitad del siglo 19, con la construcción de la primera red de comunicación sin fisuras del mundo a través de cables telegráficos transoceánicos [16], el cual permitió la comunicación instantánea entre los continentes. Durante los años de 1960 Willoughby Smith, un ingeniero electricista, se encontraba realizando pruebas a las líneas telegráficas submarinas, basadas en Selenio (Se); mientras realizaba su trabajo, notó que cuando el selenio estaba expuesto a la luz, la electricidad se transmitía bien a través del cable, pero no se realizaba transmisión cuando el selenio se mantenía en la oscuridad. Por lo tanto, para 1973 Smith, encontró accidentalmente la fotoconductividad del Selenio [17].

Durante los siguientes años, investigadores decidieron continuar con el estudio de la incidencia de la luz solar sobre el Selenio despertando el interés de científicos como William Grylls Adams y su alumno Richard Day Evans (1877) [18]. En sus observaciones durante uno de sus experimentos en una estructura semiconductor de selenio, notaron que la incidencia de luz en el material podría generar electricidad, lo cual era algo completamente nuevo además apreciaron que el rendimiento del material dependía de la cantidad de luz solar que incidía sobre él, es decir el material sólido lograba convertir la luz en electricidad sin necesidad de calor ni partes móviles.

De manera que para 1883, apareció la primera celda fotovoltaica de selenio descrita por D. C. Fritts [19], la cual fue construida colocando una capa de selenio sobre una placa metálica y cubriéndola con una delgada capa de oro. A pesar de que esta celda tenía sólo un 1% de eficiencia, fue un buen comienzo y

demonstró ser útil en el desarrollo de primeros sensores de luz utilizados en las cámaras.

Para 1918, el científico polaco Jan Czochralski realizó uno de los más importantes avances, que permitió la obtención de mono cristales de silicio (Si), con suficiente pureza para el desarrollo inicialmente de transistores, diodos y posteriormente aplicaciones fotovoltaicas [20].

Es así como para 1930 Russell Ohl y su colega Jack Scaff [21], en su trabajo experimental sobre el procesamiento de Silicio (Si), encontraron que las barras de silicio que ellos fabricaron presentaban cualidades eléctricas irrepetibles, el 23 de febrero de 1940, en uno de sus experimentos consiguieron obtener una tensión a partir de la luz que incidía en las diferentes partes del cristal produciendo efectos eléctricos opuestos, en el caso del fósforo (P) se produjo un ligero exceso de electrones mientras que el boro (B), presentaba a una ligera deficiencia (más tarde reconocida como "huecos").

Cuando los dos materiales se acoplaron, la unión formó una barrera al flujo de electrones en una dirección. Por un lado había electrones en exceso y por el contrario un déficit debido a los tipos de impurezas. Llamaron a los materiales de tipo n (por negativo) y de tipo p (positivo); la unión o "barrera" de estas regiones se conocen "uniones tipo p-n". Sorprendentemente la luz que incidía en esta unión estimulaba los electrones que fluían desde el lado n al lado p, dando como resultado una corriente eléctrica [22].

La era moderna de la energía fotovoltaica se caracterizó por el uso de materiales semiconductores, como el Silicio, (Chapin, Fuller y Pearson) [23], quienes lograron un descubrimiento accidental en los *Laboratorios Bell* en 1954 (ver figura 3), el cual revolucionó la tecnología de celdas solares, logrando la fabricación de la primera celda capaz de convertir suficiente energía solar en electricidad. *Bell Telephone Laboratories* produjeron una celda solar de Silicio con un 4% de eficiencia y más tarde alcanzaron eficiencias del 11%. Gerald Pearson y Calvin Fuller, observaron una salida eléctrica casi cinco veces mayor que el mejor reporte de celdas de Selenio, con esto lograron marcar el comienzo de una nueva era, lo que los condujo finalmente a la realización de

uno de los sueños más preciados de la humanidad: – “El aprovechamiento de la energía casi ilimitada del sol para uso de la civilización” [24]. Lamentablemente el éxito comercial, no llegó a materializarse debido a los elevados costos de fabricación.

Figura 3. Primer módulo comercial de silicio producido por laboratorios Bell, Tucson Arizona [25].



Por tanto se produjo un interés por la investigación de nuevos materiales, tanto así que en 1954 ,aparece la primera celda solar de película delgada, compuesta de una juntura a base de Cu_xS/CdS (Reynolds)[26], denominada de película delgada debido a que requería espesores del orden de μm , si bien esta condición impulso el interés por este tipo de tecnologías las eficiencias eran pequeñas comparadas con las Si-cristalino, sin embargo para su fabricación no se requerían elevados costos y además presentaban características interesantes razón por la cual se continuo su estudio.

Adicionalmente, se trabajó en encontrar mejores rendimientos, logrando que para 1956 hiciera su primera aparición la celda fotovoltaica compuesta de GaAs (Arseniuro de Galio) con una homojuntura p-n obteniendo un rendimiento del 4% [27].

Para el año de 1956, se comenzó a hacer uso de este tipo de descubrimientos en aplicaciones en la industria aeroespacial americana, su primera función fue pensada e implementada por la NASA , en el satélite Vanguard-1, el cual se

lanzó en el año de 1958, este disponía de celdas solares basadas en Si – monocristalino como principal fuente de electricidad , demostrando la importancia de la energía basada en el sol, por primera vez en la historia la energía solar resultó ser indispensable para el desarrollo de la industria aeroespacial; dada la seguridad y la fiabilidad proporcionada por la energía fotovoltaica. Más tarde ese año, Explorador III, Vanguard II, y Sputnik-3 fueron Lanzados con sistemas fotovoltaicos a bordo.

Las celdas solares de silicio lograron ser la sensación durante los años 50 y 60, principalmente en la alimentación de satélites, ya que se convirtieron en una importante fuente de energía en aplicaciones espaciales y hasta el día de hoy lo sigue siendo.

Años después cerca de 1963, con la búsqueda de nuevos materiales solo tres compuestos se consideraban como representativos de las tecnologías de película delgada, estos son Telurio de Cadmio (CdTe) , Diseleniuro de Cobre e Indio (CuInSe₂ (CIS)), el silicio amorfo (a-Si); los cuales dominaron las investigaciones, tanto así que durante los años 70 se inicia la fabricación masiva de las celdas solares tipo película delgada, éstas con el único propósito de mejorar la tecnología en cuanto a costos de fabricación y uso de materiales que fuesen más fáciles de encontrar frente a el principal protagonista durante muchos años el silicio [28] [29].

El aumento en la eficiencia de las celdas se logró mediante la introducción de nuevos conceptos en la estructura de los dispositivos y en el desarrollo de métodos modernos de producción de materiales.

Para 1978 L. Fraas y R. Knechtli proponen una celda solar usando una triple juntura y un concentrador InGaP - GaInAs -Ge [30].

Así continuo en aumento el interés por la energía solar fotovoltaica, para 1990, Martin Green de la Universidad del Sur de Gales (Australia), en sus laboratorios logro el récord mundial en eficiencia del 24% para celdas de Si-cristalino, mediante la introducción del concepto PERL (Passivated Emitter Rear Locally Diffused) [31].

En 1997 aparecen los primeros módulos comerciales utilizando una celda de silicio amorfo de triple unión, producidos por Sharp y Sanyo. Para 2011 estos módulos alcanzaron una eficiencia teórica del 22% con su celda solar HIT (*Heterojunction with Intrinsic Thin layer*) [32].

Está claro que la energía solar con el paso de los años se ha convertido en una poderosa fuente de energía. Muchas han sido las experiencias que han demostrado su gran crecimiento y por ende la importancia en su continuo estudio. A pesar de las mejoras en la eficiencia de las celdas, aún tienen que superar obstáculos como sus costos para que se puedan ser consideradas como una opción más viable de implementar, así, continuar sus estudios para poder obtener mejores eficiencias permitiendo que su uso siga y aumento de manera que junto con las demás energías renovables logren alcanzar las metas de la iniciativa Energía Sostenible para Todos (SE4ALL por sus siglas en inglés) [33], las cuales consisten en duplicar el nivel de uso de energía renovable, duplicar las mejoras mundiales en eficiencia energética, y proporcionar acceso universal a la energía para el año 2030 [34].

3. CELDA SOLAR Y ESTRUCTURA

3.1. CONCEPTOS BÁSICOS

3.1.1 Pasivación :se refiere a la formación de una película relativamente inerte sobre la superficie de un material (frecuentemente un metal), que lo enmascara en contra de la acción de agentes externos [35].

3.1.2 Límite shockley- queisser : Este límite designa la máxima eficiencia teórica de una celda fotovoltaica basada en una unión p-n [36].

3.1.3 Oxido conductor transparente (TCO): Es una capa delgada ópticamente transparente y eléctricamente conductora [37].

3.1.4 Capa de agotamiento::Se considera a la región en la que no existen ni electrones ni huecos, pero contiene átomos dadores ionizados positivamente a un lado y átomos aceptores ionizados negativamente al otro lado, por tanto se genera un campo eléctrico [38].

3.1.5 Corriente de arrastre: Se produce cuando se somete un material semiconductor a una diferencia de potencial o a la acción de un campo eléctrico externo [39].

3.1.6 Afinidad electrónica: Es la cantidad de energía absorbida por un átomo aislado en fase gaseosa para formar unión con una carga eléctrica de -1 . Si la energía no es absorbida, sino liberada en el proceso, la afinidad electrónica tendrá, en consecuencia, valor negativo tal y como sucede para la mayoría de los elementos químicos; en la medida en que la tendencia a adquirir electrones adicionales sea mayor, más negativa será la afinidad electrónica [39].

3.1.7 Corriente de difusión: El efecto de difusión se produce cuando la concentración de portadores no es uniforme a lo largo del semiconductor, o lo que es lo mismo, existe un gradiente de concentración de portadores con la distancia y un gradiente de temperatura, produciéndose un desplazamiento de portadores que trata de establecer el equilibrio (igualar la concentración en la totalidad del volumen) [39].

3.1.8 Efecto hall :La corriente de portadores se crea por la acción conjunta de un campo eléctrico y uno magnético sobre el semiconductor [40].

3.1.9 Brecha de energía prohibida (bandgap): Es la diferencia de energía entre la parte superior de la banda de valencia y la parte inferior de la banda de conducción [41].

3.1.10 Nivel de vacío E_{vac} : Es el nivel de energía de un electrón en reposo fuera del material, ósea, en el exterior del metal o semiconductor. Este nivel de referencia es útil si se conoce la posición respecto a E_{vac} de los niveles de banda de los diagramas de banda de los materiales [41].

3.1.11 Banda de valencia: La banda de valencia es el más alto rango de energías de electrones en el que los electrones están normalmente presentes en la temperatura del cero absoluto [41].

3.1.12 Banda de conducción: Es el nivel de energía donde la atracción del núcleo del átomo sobre los electrones es más débil. Ese nivel corresponde a la última órbita del átomo, la que puede compartir así sus electrones entre el resto de los átomos de un cuerpo, permitiendo que se desplacen por el mismo en forma de nube electrónica [41].

3.1.13 Nivel de fermi: Es la máxima energía ocupada por un electrón a cero grados kelvin (0°K). Por el principio de exclusión de Pauli, se sabe que los electrones llenaran todos los niveles de energía disponibles, el tope de electrones se llama energía de Fermi o nivel de Fermi [42].

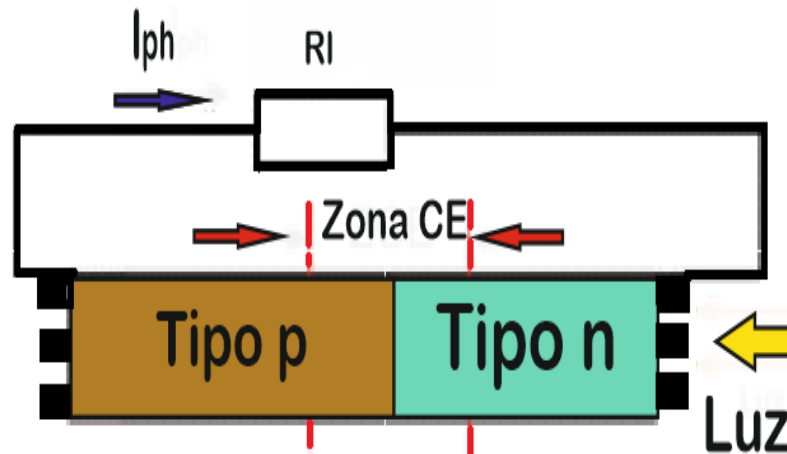
3. 2 FUNCIONAMIENTO DE LA CELDA

La celda solar es un dispositivo que convierte la energía solar en energía eléctrica, mediante un fenómeno físico llamado efecto fotovoltaico. Este incluye los siguientes procesos:

1. Generación de portadores de carga (huecos y electrones) en un semiconductor mediante absorción de fotones.

2. Generación de corriente eléctrica a través del campo eléctrico interno que se forma en la zona de carga espacial (ZCE), mediante la unión de un semiconductor tipo n con un tipo p [43].

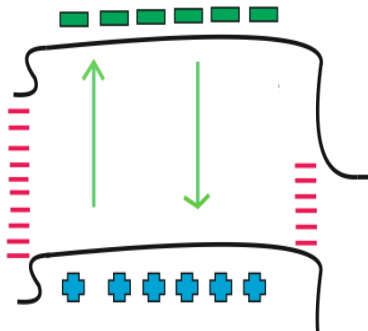
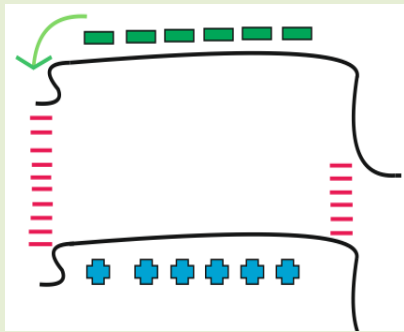
Figura 4. Estructura de una celda solar Homojuntura



La figura 4 muestra la estructura típica de una celda solar tipo homojuntura, los fotones con energía mayor o igual a la brecha prohibida (E_g) del material son captados y la energía del fotón absorbido se usa para excitar electrones de la banda de valencia a la banda de conducción, generando pares electrón hueco, los cuales pueden ser transportados por procesos de difusión y de arrastre hasta un circuito exterior, generando de esta manera una fotocorriente. Además de los procesos de difusión y arrastre existen otros procesos competitivos que tienden a disminuir la fotocorriente final. En tabla 1 se muestran los principales procesos de transporte eléctrico que intervienen en el funcionamiento de un dispositivo FV [44].

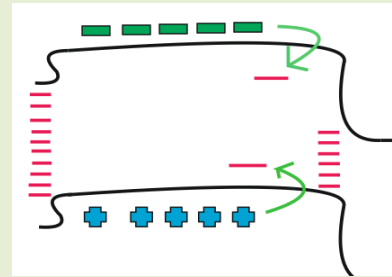
Tabla 1. Procesos de transporte eléctrico en celdas solares

ETAPA	PROCESO
Recombinación Superficial	<p>Atrapamiento de electrones en estado superficiales generados por la presencia de enlaces incompletos en la superficie del material.</p>
Recombinación volumétrica	<p>Recombinación de electrones con huecos en el volumen del material, se considera el proceso inverso a la generación, debido a que un electrón en la banda de conducción decae a un estado con más baja energía y se recombina con un hueco emitiendo un fotón.</p>



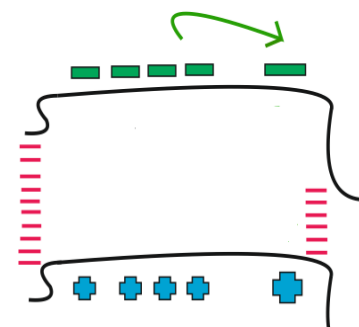
Recombinación por impurezas

Las impurezas y/o defectos pueden dar lugar a estados permitidos en el gap, los cuales actúan como centros de recombinación.



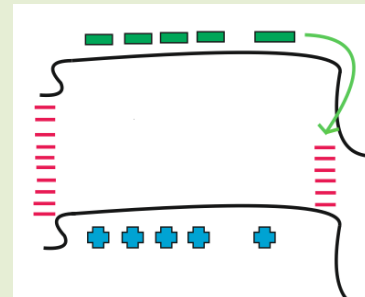
Difusión

Los electrones se desplazan de un espacio de mayor concentración a uno donde halla menor concentración.



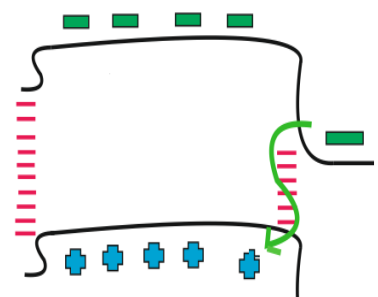
Recombinación en la interfaz

Recombinación en estados, ocurre un atrapamiento de los portadores en la interface de los dos materiales.



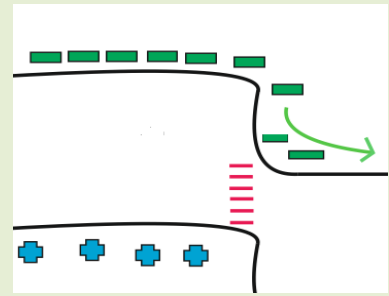
Recombinación por efecto túnel

Recombinación por Efecto Túnel: Se genera debido a la discontinuidad de las bandas, se genera la probabilidad de que los portadores atraviesen la barrera de potencial.



Barrera Schottky

El transporte de corriente a través de los portadores mayoritarios, en contraposición con las uniones p-n, donde los minoritarios, son los que presentan la mayor contribución en condiciones de polarización en inversa.

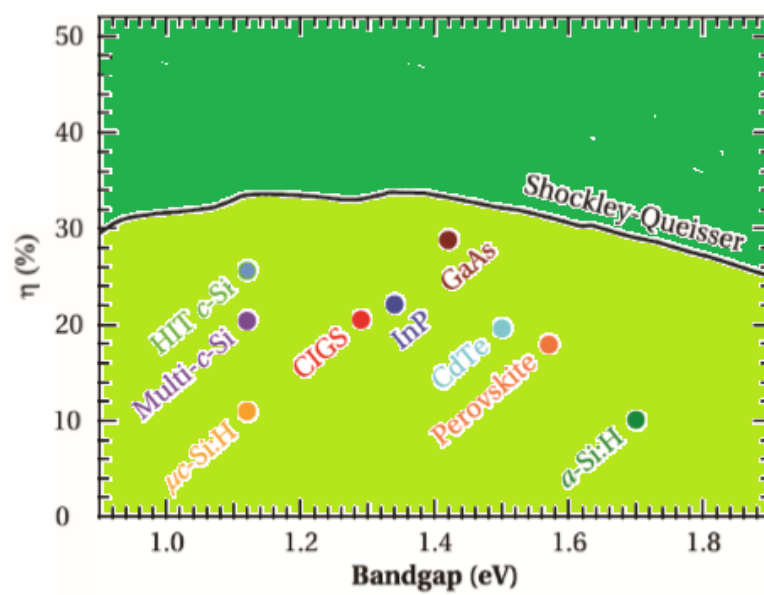


La condición que debe cumplir cualquier celda es lograr absorber la radiación solar de la manera más eficiente posible. Por lo tanto se requiere que el material usado tenga un gap adecuado, en la tabla 2 y En la figura 5 se presentan las eficiencias de algunos materiales semiconductores en función del gap y el limite Shockley-Queisser [45].

Tabla 2. Relación materiales usados para la fabricación de celdas solares con sus respectivos brechas de energía prohibida

MATERIAL	Eg (eV)
Si	1.14
Ge	0.67
GaAs	1.4
GaP	2.25
Te	0.33
CdS	2.42
CdTe	1.45
CdSe	1.72
Cu ₂ O	2.1
TiO ₂	3.0
Cu ₂ S	1.2

Figura 5. Grafica de eficiencia versus nivel de energía bandgap [45]



4. CLASIFICACIÓN DE LAS CELDAS SOLARES SEGÚN EL TIPO DE JUNTURA

Hay diferentes tipos de uniones semiconductoras que tienen posibles aplicaciones en celdas fotovoltaicas, cada unión juega un papel fundamental en la creación del campo eléctrico interno, el cual es necesario para separar los portadores foto-excitados y para hacer que fluyan como una corriente eléctrica en el circuito exterior, a continuación se listan y se procederá a explicar cada unión.

1. Homojuntura
2. Heterojuntura
3. “*Buried Homojunction*”
4. Uniones Metal-Semiconductor (barrera *Schottky*)
5. Uniones p-i-n.
6. Uniones electrolito-semiconductoras
7. Multijuntura o Celdas Tandem

4.1 HOMOJUNTURA

La homojuntura consiste en una unión de dos semiconductores del mismo material, uno dopado con conductividad tipo p y el otro dopado tipo n, de ahí el nombre, unión p – n.

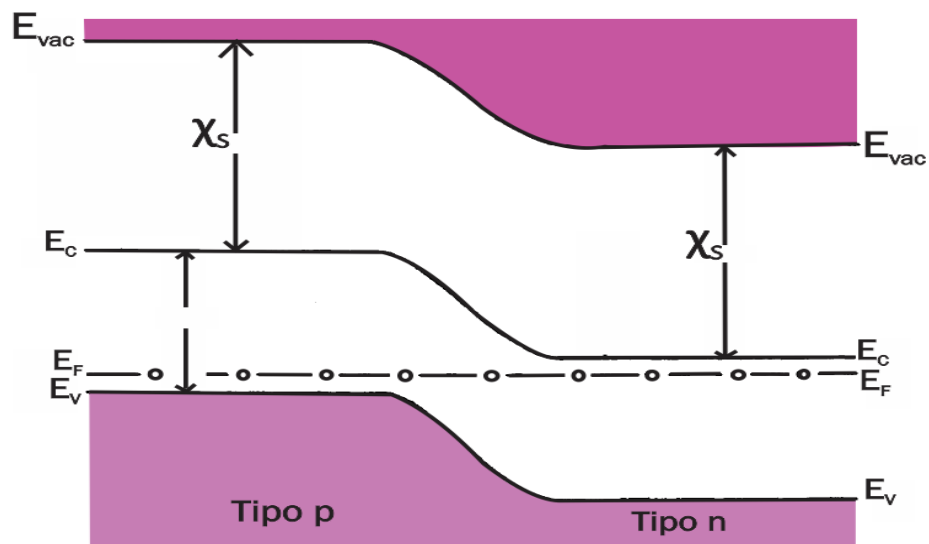
En una celda tipo homojuntura, el silicio cristalino se altera de manera que un lado es de tipo p, dominado por los huecos y el otro lado es de tipo n dominado por los electrones [46].

En el diseño de una homojuntura, varios aspectos de la celda se pueden variar con el propósito de aumentar la eficiencia de conversión:

- Profundidad de la unión p-n.
- Cantidad y distribución de átomos dopantes a cada lado de la unión p-n.
- Cristalinidad pureza del silicio.

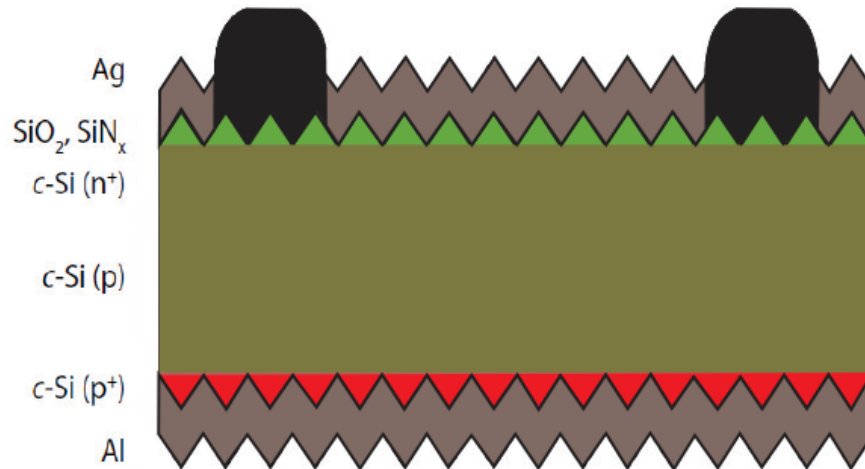
En la figura 6 se presenta un diagrama de banda de energía típico para una homojuntura p-n con igual densidad de dopaje en ambas partes, por tanto se generan anchos de agotamiento iguales para las capas a ambos lados de la unión [47]. (E_{vac}) Es el nivel de vacío, E_c es el borde inferior de la banda de conducción, E_f el nivel de Fermi, E_v el borde superior de la banda de valencia, E_G es brecha de energía prohibida y χ_s es la afinidad electrónica. Las bandas de energía en la unión entre p y n son curvas, por tanto se evidencia la presencia de un campo eléctrico interno.

Figura 6. Diagrama de banda de una celda tipo Homojuntura



En la figura 7, se puede apreciar la vista esquemática de una celda solar tipo homojuntura, la región verde representa el Silicio dopado con átomos de fósforo que forman el semiconductor con conductividad n. Por otra parte la región roja indica el dopaje con boro y forma el semiconductor p [48].

Figura 7. Esquema de una celda tipo Homojuntura



Mientras que las celdas de Si continuaron desarrollándose, comenzaron los esfuerzos sobre homojuntura de unión p-n basadas en otros materiales semiconductores como el Arseniuro de Galio (GaAs) [49].

El Arseniuro de Galio, es un semiconductor de gap directo con un ancho de banda prohibida de 1,42 eV, valor muy cercano a la máxima eficiencia de aprovechamiento del espectro solar para una homojuntura, lo que lo convierte en un material idóneo para la fabricación de celdas solares. El coste de las celdas solares de Arseniuro de Galio y su alta eficiencia, cercana al 25%, ha hecho que se concentré en usos espaciales o instalaciones terrestres de concentración. Este tipo de celdas tiene como inconveniente sus elevados costos y el gran problema de toxicidad de sus componentes que pueden suponer daños medio ambientales [50].

Las homojunturas de arseniuro de galio (GaAs) cuentan con una eficiencia máxima actual de 27,5 % y las homojunturas de silicio (Si) con una eficiencia del 27,6% como se puede apreciar en la tabla 3.

Tabla 3. Mejores eficiencias en homojunturas

Clasificación	Eficiencia (%)	Área (cm ²)	Intensidad (Soles)	Laboratorio o Institución que lo reporta
GaAs	27.5	0.0505 (da)	117	Fraunhofer ISE
Si	27,6	1.0 (da)	92	Amonix back-contract

La producción mundial de celdas solares se ha incrementado rápidamente en cerca de un 30 % en los últimos años. El silicio policristalino y multicristalino han sido la base en la actual capacidad de producción de celdas solares, lo que representa el 80% de las celdas fabricadas en la actualidad. La mayor parte de las instalaciones de producción de celdas solares todavía están basadas en silicio policristalino. Esta es una evidencia convincente de la importancia de esta tecnología que continuará durante muchos años más.

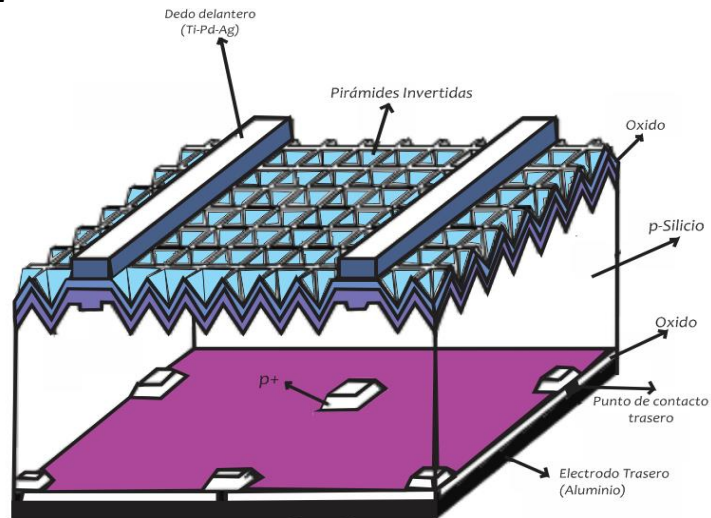
El método Czochralski (CZ (B)) ha sido ampliamente utilizado en la fabricación de celdas solares. Pero el alto contenido de oxígeno en los sustratos provoca una reacción entre el boro y el oxígeno que reduce el tiempo de vida de los portadores una vez que la celda se ilumina bajo la luz del sol. Para evitar este problema de degradación, se ha sugerido que se utilicen sustratos de bajo contenido de oxígeno, tal como MCZ (magnéticamente confinado Czochralski) y FZ (zona flotante) u otro dopante en lugar de boro [51].

Las homojunturas más representativas; las celdas solares PERL (*passivated emitter rear locally diffused*) y las celdas solares PERT (*passivated emitter and rear totally diffused*).

Las celdas Passivated emitter rear locally diffused (PERL), cuya estructura se muestra en la figura 8, demostraron una eficiencia de conversión de energía del 23,1% en 1990. Una de las principales ventajas de las celdas PERL sobre las celdas de silicio convencionales es la pasivación superficial mejorada por un

óxido producido térmicamente en el ambiente tricloroetano (TCA). Este óxido también sirve como recubrimiento solar, aunque causa una pérdida de reflexión del 3% en la superficie frontal de la celda [52]. Fue rediseñada en 1993 [53].

Figura 8 .Esquema de una celda (PERL) con un revestimiento anti reflectante de doble capa.



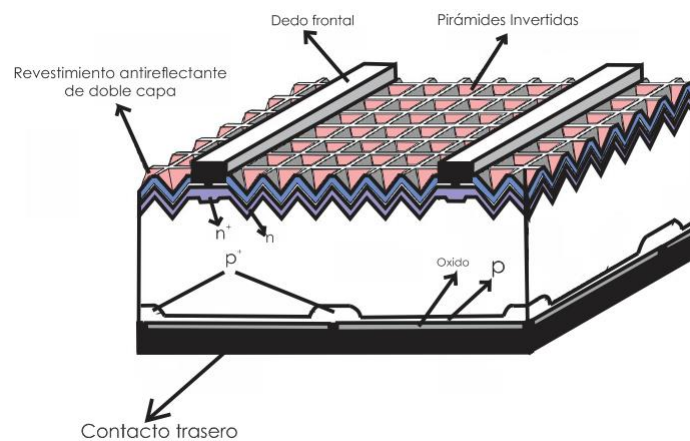
Las características clave de las celdas PERL son: La superficie superior de la celda solar se texturiza utilizando estructuras de pirámide invertida y se cubre con un revestimiento anti-reflectante de doble capa (ARC) que proporciona una reflexión superficial extremadamente baja. Las rejillas frontales de metal se definen por tecnología de fotolitografía para que sean muy delgadas, minimizando así la pérdida de sombreado del metal. Tanto la texturización de pirámide invertida como los frentes tan finos (tamaño de un dedo) de metal disminuyen las pérdidas ópticas que contribuyen a una corriente más alta para la celda solar [54] [55].

En 1999, la celda solar de estructura PERT (passivated emitter and rear totally diffused), Figura 9, se exploró en la Universidad de Nueva Gales del Sur (UNSW) usando como método MCZ (confinados magnéticamente Czochralski) en sustratos de silicio. La celda PERT ha añadido una etapa más de procesamiento para utilizar una capa de boro ligero a lo largo de toda la superficie trasera de la celda, mientras que todas las otras características de las celdas PERL permanecen [56].

Se espera que la capa conductora de tipo p que se utiliza totalmente a lo largo de la superficie trasera, proporcione una trayectoria de baja resistencia por medio de la cual los orificios generados por luz se mueven verticalmente hacia esta capa y luego se mueven lateralmente hacia las ventanas de contacto traseras con mínima pérdida de resistencia. Esta difusión en la parte posterior también debió estar comprometida entre alta conductividad y velocidades de recombinación de superficie traseras bajas. Por lo tanto, se hizo con un nivel de dopaje de boro más bajo que las regiones locales de difusión que se requerían para la pasivación del contacto metálico trasero de alta recombinación [57].

Esta estructura PERT se informó en primer lugar para mejorar los factores de relleno de sustratos de muy alta resistividad de $100 \Omega \cdot \text{cm}$ en las primeras etapas del desarrollo de celdas PERL a principios de 1991. La estructura de las celdas PERT también fue usada para fabricar celdas de alta eficiencia en el sustrato de tipo n en 1991 [58].

Figura 9. Celda solar tipo PERT Se ha registrado en la actualidad una eficiencia de 24,7% para las celdas tipo PERL y 24,5% para la celda tipo PERT

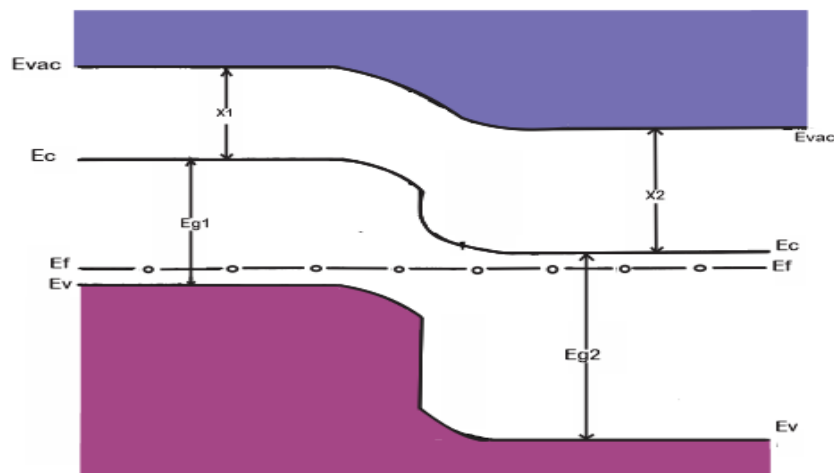


4.2 HETEROJUNTURA

Este tipo de unión es formada por dos semiconductores con diferentes brechas de energía prohibida, uno de ellos con un nivel de energía pequeño conocido como absorbente, en el cual como su nombre lo indica, tiene lugar la absorción óptica y un segundo semiconductor con una brecha de energía prohibida mayor al que generalmente se le conoce como ventana óptica, por ser altamente transparente a la radiación solar. Este tipo de unión logra eliminar la recombinación en la superficie frontal de la celda, lo que es una gran ventaja; pero presenta considerables pérdidas debido a la recombinación en la interfaz [59][60].

Un diagrama de bandas típico para una heterojuntura se muestra en la figura 10, donde el material tipo p (E_{g1}), absorbente, tiene un menor band gap que el material tipo n (E_{g2}).

Figura 10. Diagrama de banda Heterojuntura

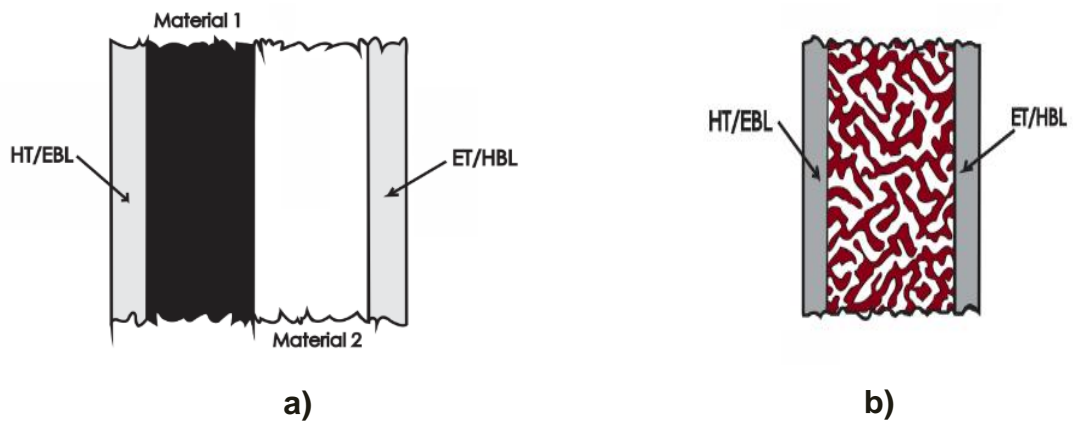


En las heterojunturas generalmente se forman discontinuidades entre las bandas, esto debido principalmente a la diferencia de afinidades, que depende de la diferencia de band gaps.

Usualmente presenta dos tipos de configuraciones posibles, “*planar heterojunction*” y “*Bulk heterojunction*”, las cuales se explican brevemente a continuación.

4.2.1 PJH "planar heterojunction": Para este tipo de configuración la estructura física de una heterojuntura *planar heterojunction* (PHJ) se representa en la figura 11. Está compuesto por dos materiales semiconductores que forman la capa activa (combinación de ventana-absorbente) [61].

Figura 11. Configuraciones celdas solares tipo a) *Planar Heterojunction* (PHJ) b) Bulk Heterojunction (BJH)



4.2.2. BJH "bulk heterojunction": En una configuración BJH (ver figura 11 b), una celda solar polimérica presenta materiales donadores y aceptores mezclados en todo el dispositivo [62].

De manera que las celdas solares con heterojunturas son capaces de lograr tensiones eléctricas particularmente altas. Esto aprovecha el hecho de que los materiales con mayores brechas de energía prohibida tienen menores concentraciones de portadores minoritarios de carga y por lo tanto se minimiza la recombinación en la interfaz metal/semiconductor de estas áreas [63].

En 1980, la empresa conocida como *Sanyo Electric* (ahora Panasonic), debido a sus investigaciones, obtiene las primeras celdas tipo heterojunturas de silicio amorfo del mundo. Sin embargo, estas celdas poseían una baja eficiencia de conversión (menos del 10%) lo que limitaba sus usos; por esta razón a mediados de los 80, buscando una mayor eficiencia, Sanyo se esforzó por desarrollar un método para analizar el rendimiento de las celdas solares colocaba el silicio amorfo de tipo p en la parte superior del sustrato de silicio de

tipo n, así, los investigadores introdujeron silicio amorfo de tipo intrínseco no dopado para prevenir la interdifusión (difusión de átomos de un metal dentro de otro metal) de impurezas, descubriendo un método que mejoraba mucho las características de la unión, lograron descubrir que las películas intrínsecas (a-Si:H) pasivaban las superficies de Silicio cristalino (c-Si) notablemente bien [64].

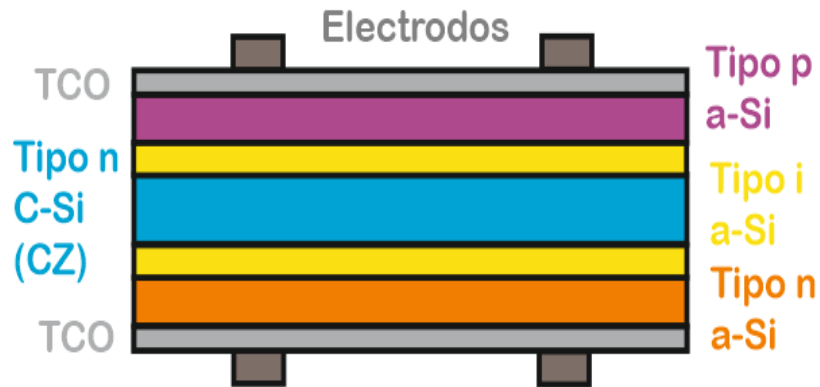
Para 1997, se introdujo en el mercado el módulo fotovoltaico HIT, que contiene la primera celda solar de heterojuntura del mundo [65].

El interés por este tipo de celdas ha hecho que numerosos grupos de investigación hallan centrado sus estudios en mejoras de su eficiencia, entre los que se destacan el Instituto de Tecnología de Tokio (Tokyo Tech) y el Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología (AIST) industrial en Japón, el National Renewable Energy Laboratory (NREL) en EE.UU, Centro Helmholtz de Berlín (HZB), Instituto Fraunhofer de Sistemas de Energía Solar (ISE Fraunhofer) en Alemania, L'Institut National de l'Energie Solaire (INES) en Francia, Neuchatel PV-laboratorio de la Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) en Suiza, Agencia Nacional de Nuevas Tecnologías, la energía y el ambiente, (ENEA) en Italia y la Universidad Mingdao en China, grupo de Materiales Semiconductores & Energía Solar en Colombia [66].

4.2.3 HIT *heterojunction with intrinsic thin layer* :En 1990, científicos de SANYO comenzaron a trabajar en celdas solares con heterojuntura, para esto usaron obleas de silicio cristalino con una unión tipo p-n.

La estructura de la celda solar HIT se muestra en la Figura 12. Básicamente sobre una superficie, se forma una capa de a-Si (silicio amorfo) tipo p, sobre una capa de Silicio amorfo (a-Si) intrínseca (i) depositada sobre un sustrato de silicio cristalino tipo n texturizado para formar una unión p-n [67].

Figura 12 . Estructura de celda solar tipo HIT [68]



En la otra superficie, se forma una capa tipo n, sobre una capa de Silicio tipo intrínseco depositada sobre un sustrato tipo n para formar un campo de superficie posterior denominado *Back surface field* (BSF). En ambos lados de la celda se deposita óxido conductor transparente (TCO) y electrodos en forma de rejilla metálica. Todos estos procesos de producción se realizan por debajo de 200 ° C para evitar cualquier daño térmico a los componentes de la celda. Para mejorar este tipo de celdas han trabajado continuamente rompiendo récords de eficiencia y rendimiento.

El récord anterior [69] para la eficiencia de conversión de celdas solares fue del 24,7%, según anunció Panasonic en febrero de 2013 (área de la celda: 101,8 cm²).

Panasonic Corporation anunció para principios del 2014, su mejora en eficiencia de conversión del 25,6% (celda de área: 143,7 cm²)[70], un aumento importante en comparación con el récord mundial previo de celdas solares de silicio cristalino.

Tabla 4. Propiedades de la celda HIT con mayor eficiencia.

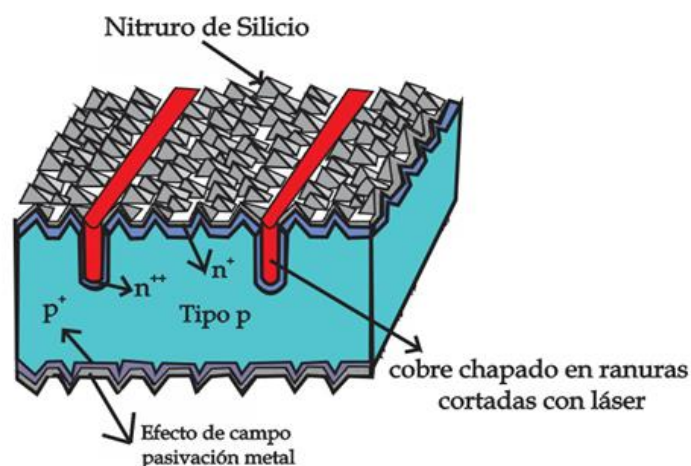
Tensión de circuito abierto V_{oc}	0.740 V
Corriente de corto circuito I_{CC}	6.01 A
Densidad de corriente de corto circuito J_{CC}	41.8 mA/cm ²
Factor de llenado FF	0.827
Eficiencia de conversión	25.6%

4.3 “BURIED HOMOJUNCTION”

El concepto de celdas solares “*buried homojunction*” o “*Buried contact*” fue desarrollado y patentado por la Universidad de Nueva Gales del Sur (UNSW) por S. Wenham y M. A. Green [71] [72], a mediados de los ochenta. La investigación sobre este tipo de celda solar fue motivada por la fabricación de módulos de alta eficiencia que aplican tecnologías de bajo costo, para obtener las mejores propiedades de una homojuntura y una heterojuntura, así reducir al mínimo los inconvenientes que presenta cada juntura por separado.

En la figura 13, se presenta la estructura de una celda *BURIED CONTACT*.

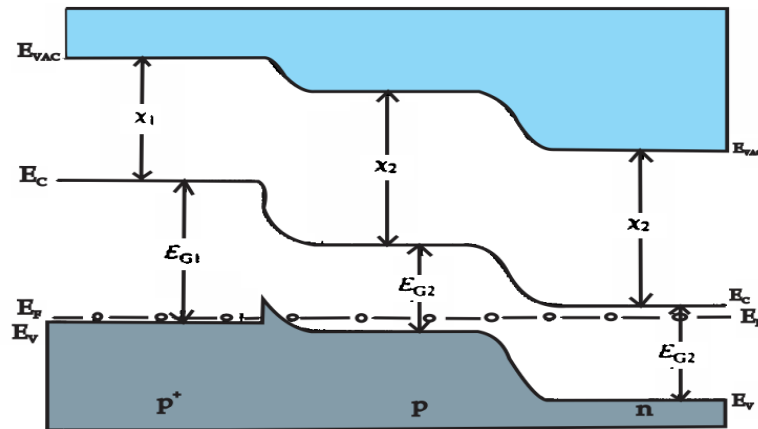
Figura 13 .Celda sola tipo “*Buried Contact*”



El diseño del dispositivo incluye características que garantizan alcanzar altas eficiencias de conversión, tales como pasivación de la superficie en el lado delantero y trasero, una superficie frontal texturizada y una metalización de alta

calidad con pérdidas de sombreado bajas y baja resistencia de contacto [73]. Su estructura de bandas se muestra en la figura 14.

Figura 14. Diagrama de banda de energía “*Buried Contact*” unión p-n en la que el material p^+ actúa como una gran ventana de intervalo de banda y un contacto óhmico con el material tipo p.



La estructura mostrada consiste en un material de tipo p^+ de bandgap grande que forma una heterojuntura con un material de tipo p de bandgap más pequeño, que a su vez forma una homojuntura con un material de tipo n con el mismo intervalo de banda. El propósito primario de la estructura es disminuir las pérdidas debidas a la recombinación superficial en el área donde se encuentra la configuración de la homojuntura proporcionando la unión $p^+ - p$. Uno de los desarrollos más exitosos de este tipo de celdas es la celda $p^+ - GaAlAs - p - GaAs - n - GaAs$ [74] [75].

Una característica clave de alta eficiencia en este tipo de celdas es el contacto, se requiere que el metal este enterrado enterrado en una ranura formada por láser dentro de la celda de silicio, debido a que generalmente las pérdidas por sombreado son uno de los grandes problemas. Con esta estructura “*buried contact*”, las pérdidas de sombreado sólo son más bajas del orden de 2 al 3%, esto permite una baja reflexión y por lo tanto mayores corrientes de cortocircuito [76].

Además de buenas propiedades de reflexión, la tecnología de contacto enterrado también permite bajas pérdidas de resistencia parasitaria [77].

En la tabla 5 se presentan eficiencias, de las celdas “*Buried contact*” convencionales sobre Cz-Si, con un área de 24 cm²

Tabla 5. Mejores eficiencias Buried Contact.

Nombre de la celda	Eficiencia (%)	Voc(mV)	Jcc(mA/cm ²)	FF (%)
EWT	20,6	591	37,4	75,1
Conv. With full area BSF	21,1	612	35,2	77,1
Conv. With local BSF	19,7	607	34,2	75,6

4.4 UNIONES METAL-SEMICONDUCTOR (BARRERA SCHOTTKY)

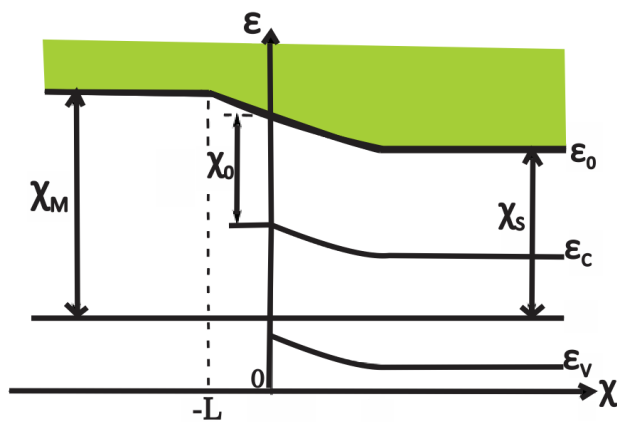
Cuando un metal y un semiconductor se ponen en contacto, los electrones libres que ocupan espacios relativamente altos en la superficie del contacto del semiconductor disminuyen la energía al ir a ocupar niveles más bajos disponibles en el metal. Como consecuencia de ello se forma una capa vacía en el semiconductor; los electrones que entraron en el metal se distribuyen formando una capa cargada sobre la superficie de contacto, para compensar las cargas positivas de la capa vacía del semiconductor, dicha barrera recibe el nombre de barrera Schottky [78].

En un semiconductor *n* el campo eléctrico está formado por la carga positiva de la zona de vacío y una muy delgada capa de carga negativa alojada en pocos átomos de metal. Si esta barrera es muy gruesa logra acumular portadores

mayoritarios, y si es muy delgada puede servir como contacto óhmico. Esta estructura a menudo es dominada por los estados de interfaz.

En el caso de los dispositivos fotovoltaicos se pretende que el contacto entre el metal y el semiconductor sea óhmico [79], su estructura de bandas se presenta en la figura 15.

Figura 15. Diagrama de bandas para la unión metal-semiconductor tipo n $\chi_M > \chi_S$



Para el caso de un semiconductor tipo n, donde la afinidad electrónica χ_M (Afinidad electrónica del metal) $>$ χ_S (Afinidad electrónica del semiconductor), presenta una capa de agotamiento positiva. La resistencia de esta capa es mucho mayor que el volumen del semiconductor. Esta capa detiene el flujo de corriente a través de esta región, convirtiéndose así en una capa de bloqueo. Ahora, si en lugar de un semiconductor tipo n, se tiene un semiconductor tipo p, el diagrama de bandas de energía será el mismo, pero ahora la carga positiva estará relacionada no con la extracción de electrones sino con la inyección de huecos dentro del semiconductor y la resistencia de esta capa decrecerá obteniendo una capa antibloqueo [80].

Cuando hay contacto entre dos materiales siempre se tendrá un intercambio de electrones. En el caso del contacto entre un material tipo n y un metal, los electrones de valencia se intercambian con los electrones de conducción.

De manera que para un conductor tipo n, la función de trabajo del contacto Schottky debe ser mucho mayor que la del semiconductor, todo lo contrario para un conductor tipo p.

En la tabla 6, se presenta las funciones de trabajo para diferentes materiales [81].

Tabla 6. Funciones de trabajo de principales elementos para uso en celdas solares

Elemento	Funciones de trabajo [eV]
Aluminio	4,08
Berilio	5,0
Cadmio	4,07
Calcio	2,9
Carbono	4,81
Cesio	2,1
Cobalto	5,0
Cobre	4,7
Oro	5,1
Hierro	4,5
Plomo	4,14
Magnesio	3,68
Mercurio	4,5
Níquel	5,01
Potasio	2,3
Platino	6,35
Selenio	5,11
Plata	4,73
Sodio	2,28
Uranio	3,6
Zinc	4,3

La unión metal-semiconductor, presenta un contacto de bloqueo; es decir, se tiene una barrera de campo electrostático, que comienza en la superficie del semiconductor como la fuente principal de la acción fotovoltaica, esta principalmente se encarga de proteger la celda contra las influencias ambientales, además funciona como una capa antirreflectante, lo que hace que se reduzcan la velocidad de recombinación superficial.

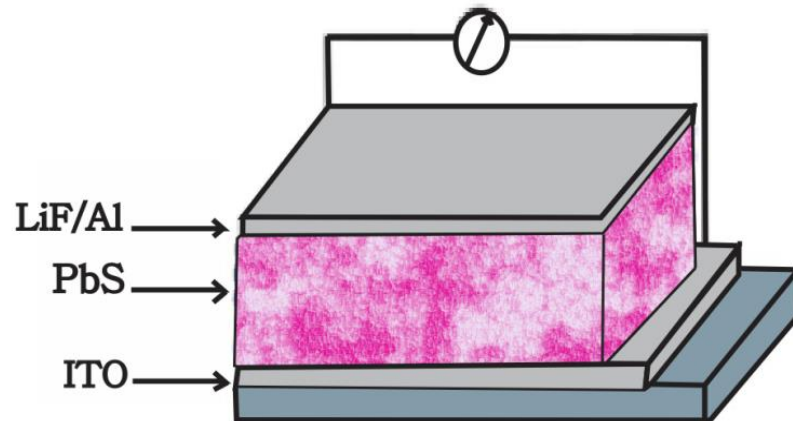
Se puede hablar de dos tipos de celdas, según su estructura:

- Estado sólido: unión metal-semiconductor **MS** o una capa intermedia metal-intrínseco-semiconductor **MIS**. Este tipo de celdas usan la diferencia entre el potencial electroquímico de un metal y el del semiconductor (típicamente medido para ambos materiales por sus funciones de trabajo) para configurar el campo electrostático superficial en el semiconductor.
- Electrólito-estado sólido: esta unión utiliza un líquido-semiconductor en su configuración, esta celda utiliza la diferencia entre el potencial electroquímico de un electrolito (típicamente medido para electrolitos por el potencial redox) y el del semiconductor para configurar el campo electrostático superficial [82].

En electrolitos no acuosos resulta algo más estable, pero disminuye sensiblemente la eficiencia de las celdas. Las celdas solares fotoelectroquímicas constituyen otra variante en la conversión fotovoltaica, este tema se tratara más adelante

4.4.1 Celdas solares PbS nanocrystal schottky : La fabricación de este tipo de celda solar, se basa en una estructura sencilla, nanocristales de Sulfuro de plomo (PbS) son depositados sobre el óxido de indio y estaño (ITO) formando un contacto óhmico, de manera que los electrodos metálicos evaporados en la parte superior, forman la unión de Schottky (ver figura 16).

Figura 16. Esquema del dispositivo fotovoltaico con capa nanocrystal PbS insertado entre el ITO y los electrodos LiF / Al [83].



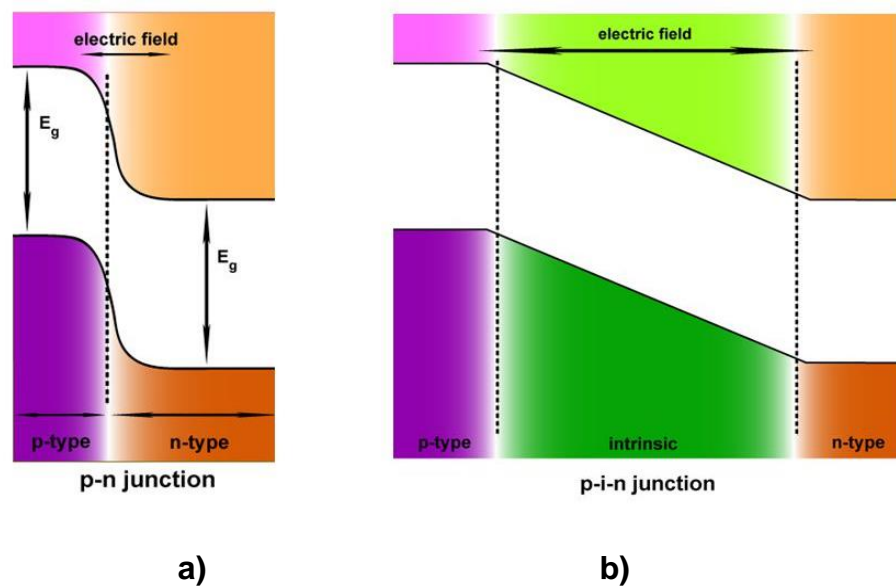
Dicha estructura permite una investigación sistemática de la calidad de los nanocristales en el rendimiento del dispositivo, ya que el PbS es el único material fotoactivo y conductor. Los primeros dispositivos hechos con esta estructura lograron eficiencias de conversión alrededor del 2% [84], pero bajo la simulación de la iluminación AM 1.5, alcanzó un récord en eficiencia del 5,2%, que es la mayor eficiencia reportada para celdas solares PbS usando una unión Schottky.

Los recientes avances en la síntesis y la caracterización de los nanocristales semiconductores (NCs) han mejorado mucho la capacidad de adaptar sus propiedades electrónicas y ópticas, haciéndolos adecuados para varias aplicaciones; en particular, los nanocristales de Calcogenuro de plomo muestran un confinamiento cuántico muy fuerte y una muy buena absorción de banda ancha, que los hacen atractivos para aplicaciones en celdas fotovoltaicas (FV) [85].

4.5 JUNTURA TIPO p-i-n

La unión p-i-n es un semiconductor de 3 placas. Las regiones habituales p y n están presentes y son altamente dopadas, pero entre ellos existe una capa de material intrínseco o no dopada. [86]. Típicamente, este tipo de unión se fabrica a partir de silicio amorfo. El absorbente en una unión p-i-n suele ser una capa gruesa no dopada del mismo semiconductor donde se produce la absorción principal de la luz y el transporte de portadores debido al campo eléctrico generado por los semiconductores p [87]. El diagrama de bandas de la unión p-i-n se puede ver en la figura 17, donde se compara con el diagrama de bandas de la unión p-n.

Figura 17. Diagrama de banda de a) unión p-n b) unión p-i-n



La ventaja de este tipo de unión sobre la p-n es que posee una mejor longitud de camino medio recorrido, lo que permite que los fotones penetren profundamente en la celda.

Solo los pares electrón-hueco generados en y cerca de la región de agotamiento contribuyen a la generación de corriente. La región de agotamiento se extiende por toda la zona intrínseca [88]. Algunos de los

desarrollos más eficientes en celdas solares tipo p-i-n son la celda “*back point contact*” (BPC), silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H) y Telurio de Cadmio (CdTe).

4.5.1 Silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H):El Silicio amorfo Hidrogenado cuenta con un gap directo en torno a los 1,7 eV [89] permite fabricar dispositivos con espesores inferiores a 1 μm . El efecto fotovoltaico en este tipo de unión fue observado por primera vez en 1974 utilizando películas depositadas mediante descarga luminiscente en DC de hidruro de silicio (SiH_4) usando uniones p-i-n y barrera Schottky. Inicialmente contaba con eficiencias de menos del 1% debido a contactos deficientes, pero en 1976 se alcanzó una eficiencia de 2,4% empleando uniones p-i-n [90].

El silicio amorfo tiene una alta cantidad de defectos que conduce a propiedades semiconductoras indeseables, tales como pobre fotoconductividad, evita el dopaje. Para mejorar esta condición se introduce hidrógeno durante la fabricación de silicio amorfo, mejorando la fotoconductividad y permitiendo el dopaje [91].

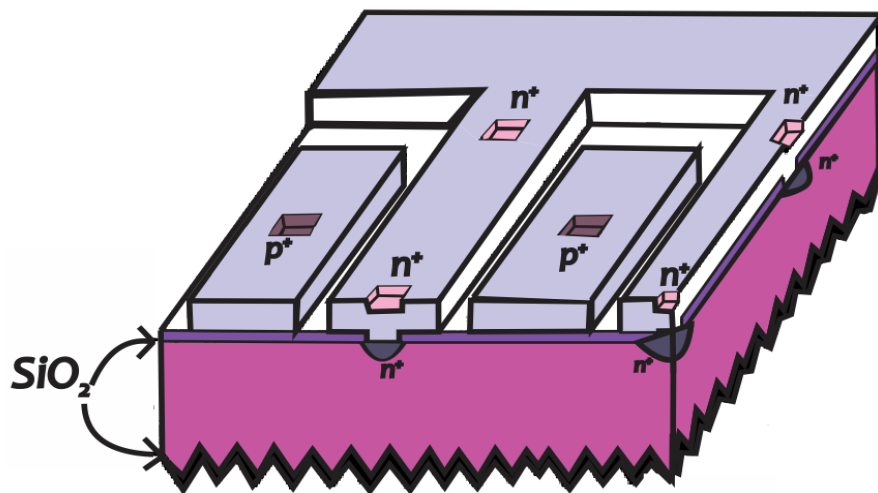
Las mejoras continuas en las condiciones de deposición condujeron a una eficiencia del 6,1% en celdas p-i-n para 1980, y 7,5% en 1981 utilizando una de capa de tipo p con un band gap más grande, dopado con aleaciones de Boro (a-Si: C: H). En 1982 se logró una eficiencia del 10,1 % con una estructura similar. Desafortunadamente con esta nueva condición sufre una degradación eléctrica en el tiempo conocida como el efecto *Staebler-Wronski* [92].

Para contrarrestar este efecto se usa Boro para dopar la estructura (a-Si: H) obteniendo como resultado un aumento de la absorción y una menor vida para los portadores, lo que lleva a una pérdida de la corriente foto inducida. Una estructura con una brecha de energía prohibida más pequeña y una aleación (a-Si:Ge:H), alcanza eficiencias del 8,1% y para 1989 ya había alcanzado una eficiencia del 14% aproximadamente.

4.5.2 “Back point contact” (BPC):Un gran avance en la eficiencia se logró mediante una cuidadosa atención al control de materiales y al diseño de celdas con la pasivación de óxido de las superficies delantera y trasera. Las celdas se forman sobre sustratos de Silicio de alta temperatura, con una estructura p-i-n. Su estructura es similar a la celda “back contac” ya que tiene ambos contactos eléctricos en la parte trasera.

La celda “back point contact”, en lugar de tener distancias de separación alternando n y p, solo posee un contacto de metal que toca el silicio en una serie de puntos en la superficie posterior. Las áreas de contacto contienen pequeñas regiones difusas que se alternan entre los de tipo p y los de tipo n como un tablero de ajedrez [93],[94]. El recorrido de luz en la superficie frontal se consigue texturizando piramidalmente la superficie, y un espejo en la superficie posterior refleja la mayor parte de los fotones no absorbidos en ángulos que dan lugar a una reflexión interna total. Esta captura de luz es esencial debido a la necesidad de mantener la celda delgada para minimizar la recombinación y maximizar la recogida de los portadores fotogenerados [95]. La estructura de la celda “back point contact” se puede ver en la figura 18.

Figura 18. Celda solar back point contact (BPC).



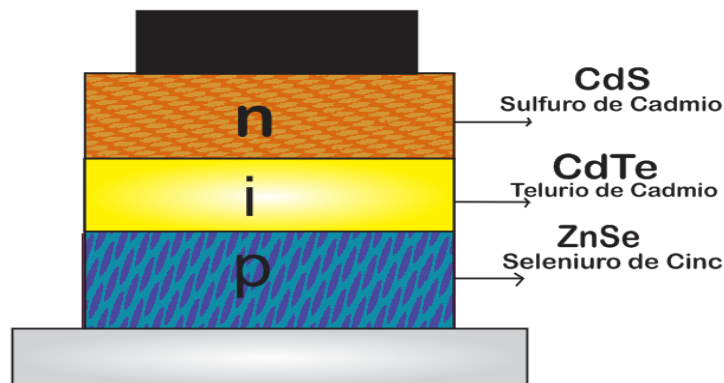
El tamaño pequeño de los contactos permite una disminución considerable en la recombinación, pero la resistencia de contacto debe ser minimizada. Se

presta una atención cuidadosa a minimizar la velocidad de recombinación superficial sobre toda la superficie de la celda y a mantener la vida útil máxima del portador, ya que los portadores fotoexcitados cerca de la parte superior de la celda deben difundir a los contactos en la parte posterior [96].

En la figura 19 se presenta un esquema de las primeras celdas que superaron el 22% de eficiencia bajo iluminación terrestre normal. La celda más eficiente de la que se tiene datos tiene un espesor de 120 μm , una superficie de 0,15 cm^2 con una longitud de los dedos de metal de 3 mm, y una eficiencia de 28% a 15 W / cm^2 de AM1.5 de iluminación (alrededor de 150 soles).

4.5.3 Telurio de cadmio (CdTe): Utilizan una estructura n-i-p, que es una variación de la estructura p-i-n. En una estructura n-i-p una capa de CdTe intrínseca se intercala con Sulfuro de Cadmio (CdS) tipo n dopado y Seleniuro de Cinc (ZnSe) tipo p dopado, haciendo que los fotones incidan sobre la capa n dopada.

Figura 19 . Unión n-i-p telurio de cadmio (CdTe)



4.6 UNIONES ELECTROLITO-SEMICONDUCTOR

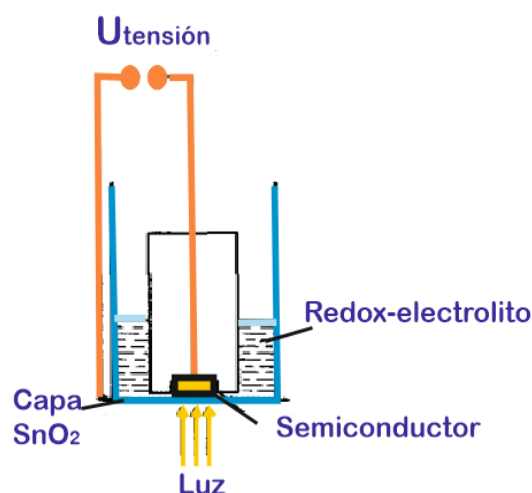
Una celda solar fotoelectroquímica (PEC) puede generar no sólo energía eléctrica sino también electroquímica y proporcionar la base para un sistema con un componente de almacenamiento de energía (PECS) [97]. La insolación

(número de horas en un período determinado de tiempo durante el cual una superficie recibe la luz del sol) energética en los semiconductores puede conducir la oxidación o reducción, generar energía química, eléctrica o electroquímica. Estas celdas basan su principio de funcionamiento en la unión de un semiconductor con un electrolito. La interfaz electrolito-semiconductor es fácil de formar lo que constituye una ventaja frente a otras uniones sólidas [98] [99].

El PEC utiliza la luz para llevar a cabo una reacción química, convirtiendo la luz en energía química. Utilizando celdas fotoelectroquímicas se lograron alcanzar eficiencias de 15-17% [100]. Sin embargo, la aplicación a gran escala de esta tecnología como alternativa energética no ha sido posible, ya que los semiconductores idóneos para el aprovechamiento de la energía solar suelen degradarse con relativa rapidez en contacto con electrolitos.

Los sistemas fotoelectroquímicos pueden facilitar no sólo la conversión de la energía solar a la eléctrica, sino que también han conducido a investigaciones sobre la síntesis fotoeléctrica y la producción fotoelectroquímica de combustibles [101].

Figura 20. Dispositivo básico para la fabricación de una celda electroquímica



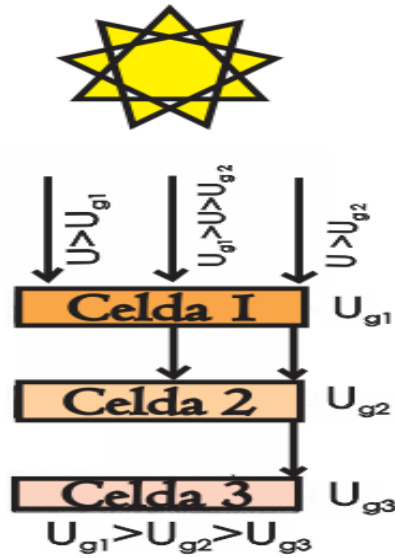
En la figura 20, se presenta el diagrama de un dispositivo básico para la fabricación de este tipo de celda fotoelectroquímica. Al iluminar el electrodo se curvan las bandas del semiconductor, se reduce y se genera un fotovoltaje, este actúa como una fuerza motriz para mover electrones a partir del semiconductor al contacto metálico, mientras que los huecos reaccionan con el electrolito [102].

La celda más representativas de este tipo de unión, son las sensibilizadas con colorantes, las cuales presentaremos con mayor detalle en el siguiente capítulo.

4.7 MULTIJUNTURA O CELDAS TANDEM

La estructura de celdas con uniones Tándem o multijuntura, en general, consisten en dos o más celdas, cada una de las cuales presenta un band gap diferente, de manera que la luz pasa a través de la celda superior de la disposición hasta la celda con menor brecha de energía prohibida [103]. Es decir en su organización se apilan de modo que la celda superior es la encargada de absorber todos los fotones en y por encima de su banda de energía prohibida, de esta manera transmite los fotones menos energéticos a las celdas de abajo (ver figura 21). Los valores de band gap seleccionados para multijuntura (MJ) dependen del número de uniones utilizadas.

Figura 21. Estructura básica con Multijuntura



Este tipo de celdas de alto rendimiento ofrece un camino prometedor hacia la obtención de alta potencia por unidad de costo. Debido a que este tipo de configuración ha presentado grandes incrementos en el rendimiento en comparación con celdas de una sola unión.

Los inicios de estas celdas se dieron para el año de 1955 [104], y aún continúan vigentes sus investigaciones. En la tabla 7 se resumen los primeros avances [105].

Tabla 7. Avances en celdas con Multijuntura

Año	Celdas Tándem	Eficiencia	Investigador
1955	Comienzo de estudio de las celdas solares Multijuntura		Jackson
1982	AlGaAs/GaAs	15.1%	RTI
1987	AlGaAs/GaAs	20.2%	NTT
1990	GaAs/GaAs (con concentradores)	34.2%	Boeing
1994	InGaP/GaAs tándem	29.5%	NREL

Las celdas tradicionales de una sola juntura tienen una eficiencia teórica máxima del 34%, un número infinito de uniones tendría una eficiencia limitante del 86,8% bajo luz solar altamente concentrada.

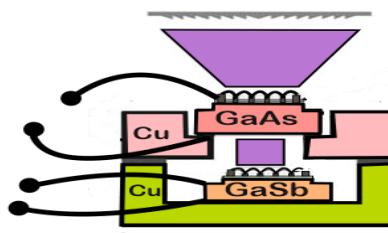
Las celdas de Arseniuro de Galio (GaAs), han logrado sobresalir en comparación con las de silicio, debido a que poseen una banda de energía prohibida más grande características como los bajos valores de variación de eficiencia con respecto a la temperatura, la baja velocidad de degradación de los parámetros y su largo tiempo de vida (hasta 15 años) en órbitas espaciales debido a la mayor recombinación y aniquilación de defectos puntuales de radiación [106]; además, una banda prohibida más grande (1,4eV), en consecuencia no absorben la luz del sol con longitudes de onda mayores a 0,9 μm , razón por la cual, es más bajo el valor de la corriente de saturación.

Los dispositivos multijuntura GaAs, hasta ahora son las celdas solares más eficientes, alcanzando un máximo histórico de 40.7% de eficiencia bajo condiciones de concentración solar y de laboratorio. Estos dispositivos utilizan de 20 a 30 semiconductores diferentes en capas en serie [107].

Este tipo de celdas son construidas bajo dos enfoques:

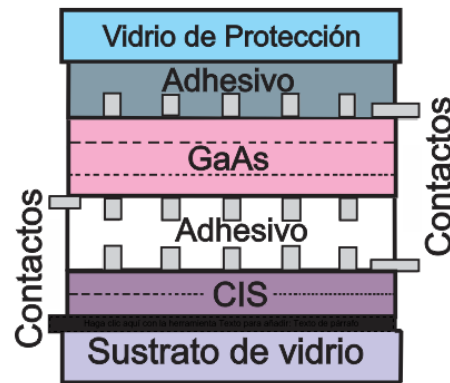
4.7.1 Celdas apiladas mecánicamente: Principalmente emplean las siguientes combinaciones de materiales $\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As-Si}$ o GaAs-GaSb , como se observa en la figura 22, este último compuesto en particular a presentado buen rendimiento de 46%, medida por laboratorios AIST en Japón [108].

Figura 22. Diagrama de una celda solar apilada mecánicamente GaAs-GaSb con doble unión



Las celdas apiladas mecánicamente ofrecen una mayor flexibilidad en términos de las conexiones eléctricas que se pueden usar. Esta configuración requiere que todas las homojunturas, excepto la que está abajo, sean transparentes a la luz por debajo de sus brechas de banda, además, pueden utilizar materiales completamente incompatibles para producir dispositivos eficientes. Un buen ejemplo es la celda GaAs / CuInSe₂ (figura. 23) desarrollada por Boeing durante los años ochenta [109].

Figura 23. Configuración de una celda GaAs / CIS apilada mecánicamente



4.7.2 Celdas de estructura monolítica usando un método como MOCVD (deposición química de metales orgánicos en fase vapor): Uno de los primeros intentos exitosos de producir una celda solar tándem monolítica (a veces llamada "estructura en cascada") implicó el uso de seis o siete capas de materiales como el Arseniuro de Galio (GaAs) y Arseniuro de Galio-Aluminio (AlGaAs) sobre un sustrato de Arseniuro de Galio (GaAs) para formar una estructura monolítica de dos uniones, conectada internamente en serie por una unión transparente p+-n+ de baja resistencia. La eficiencia obtenida en este ensayo fue del 9%. Las estructuras de celdas solares basadas en AlGaAs-GaAs tienen una velocidad de recombinación de superficie baja y alcanzan una eficiencia superior al 30% [110].

La ventaja de este tipo de configuración en celdas de multijuntura en comparación con las celdas apiladas mecánicamente es el uso de un solo sustrato. Esto tiene un impacto positivo en la reducción de los costos, pero este tipo de celdas requieren una estructura más compleja, para esto emplea la técnica MOVPE (metal-organic vapour phase epitaxy). Los investigadores del NREL (National Renewable Energy Laboratory, EE.UU.) fueron los primeros en obtener un aumento de la eficiencia en una doble unión monolítica en celdas solares. Estas celdas con multijuntura constan de múltiples películas delgadas producidas usando un haz molecular epitaxial. Una celda de triple unión, por ejemplo, puede estar formada por semiconductores como GaAs, Ge y GaInP [111]. Cada tipo de semiconductor tendrá una energía característica de la banda que hace que absorba la luz más eficientemente a un cierto espectro de la radiación electromagnética. Los semiconductores son elegidos cuidadosamente para absorber casi todo el espectro solar, generando electricidad de la mayor cantidad de energía solar posible.

4.7.3 Apilamiento mecánico de celdas monolíticas: Este tipo de celdas se basa en el aprovechamiento de sus ventajas en particular, como resultado se obtienen celdas de doble unión monolítica, en la parte superior $\text{Ga}_{0.35}\text{In}_{0.65}\text{P}$ / $\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{As}$ y GaSb como la celda inferior, alcanzando eficiencias del 33,5%, según los investigadores de los laboratorios el Fraunhofer ISE.

5. GENERACIONES PROPUESTAS POR MARTIN GREEN

El desarrollo de celdas fotovoltaicas de alta eficiencia, y costos reducidos se ha convertido en un reto para la industria. El campo de los materiales, es un buen ejemplo, porque con los distintos avances se ha podido encontrar propiedades que resultan muy favorables, como es el caso del silicio, un material que aun con el tiempo sigue manteniendo su lugar. De esta manera el profesor Australiano Martin Green realiza un trabajo brillante clasificando los avances en celdas solares en orden de aparición por generaciones así:

5.1 PRIMERA GENERACIÓN

Estas celdas solares se basan en dos grupos obleas de Silicio cristalino (S-C) y obleas de Silicio policristalino (M-C) que normalmente están interconectados en serie para formar módulos fotovoltaicos [\[112\]](#).

La fabricación de celdas solares de Silicio se basa en tecnologías de alto rendimiento y confiables, ya que se benefició enormemente de su simbiosis con la industria. Las mejoras continuas en la tecnología, da como resultado módulos de mejor desempeño, por ejemplo el silicio monocristalino cuenta con una eficiencia 25,6% [\[113\]](#); mientras que los basados en silicio multicristalino han logrado una menor eficiencia hasta ahora de 20,6%, pero a costos más bajos [\[114\]](#).

Debido al continuo esfuerzo de reducción de costos y el fuerte desarrollo de las capacidades de producción de Silicio policristalino puro, en cuanto a celdas y módulos, la industria fotovoltaica del Silicio logró mantenerse desde la década de 1970, reduciendo los costos por módulos a un promedio de alrededor de 1\$/Wp [\[115\]](#).

En la última década este progreso obstaculizo la segunda generación (de película delgada), que tuvo su era particularmente entre 2002 y 2008, cuando

la escasez de silicio policristalino condujo a altos precios. Hoy en día, los altos rendimientos y los bajos precios obtenidos hacen que sea cada vez más difícil para las próximas tecnologías competir con la tecnología del Silicio que es la convencional [\[116\]](#).

Los módulos de Silicio cristalino (c-Si) actualmente están dominados por los de tipo oblea que cuentan con un espesor de 180 μm a 250 μm , el cual, se utiliza sobre todo para aumentar el rendimiento mecánico durante su procesamiento [\[117\]](#). Así, los módulos de Silicio constituyen una fuerte influencia, razón por la cual la comunidad está desarrollando medidas para disminuir el consumo de Silicio por W_p [\[118\]](#).

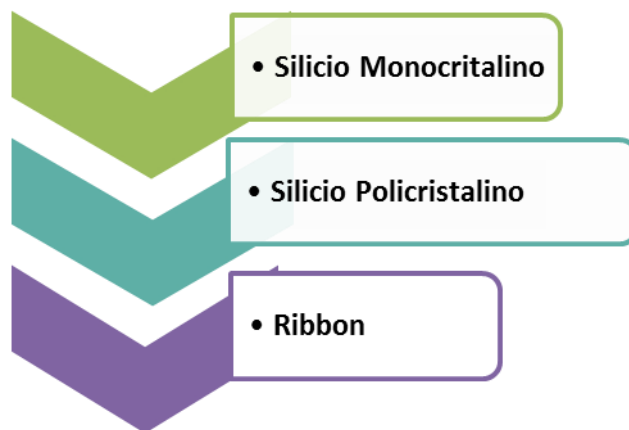
5.1.1 Silicio monocristalino: Como su nombre indica, se fabrica a partir de cristales individuales de silicio mediante el proceso de Czochralski [\[119\]](#), con el fin de obtener cristales de Si, los cuales se cortan a partir de los grandes lingotes. Estas grandes producciones de cristal individuales requieren un procesamiento preciso llamado "recristalización"; esta es una razón para que este tipo de celdas tengan costos tan elevados, además de los múltiples procesos. La eficiencia de las celdas solares de silicio monocristalino se encuentra en 26,3% [\[120\]](#).

5.1.2 Silicio policristalino: Esta tecnología ha alcanzado eficiencias del 21,3% [\[121\]](#). En el proceso de fabricación, el silicio fundido se convierte en lingotes de silicio, luego se cortan en obleas muy finas y se ensamblan en celdas completas. Las celdas policristalinas (también conocidas como multicristalinas) son más baratas de producir que las monocristalinas, debido a un proceso de fabricación más sencillo. Sin embargo, tienden a ser ligeramente menos eficientes [\[122\]](#).

5.1.3 Ribbon: Este tipo de tecnología produce cintas o laminas delgadas de silicio cristalino; si bien en este proceso para la producción de una cinta de alrededor de 5g de silicio por vatio, hay un desperdicio del material, este resulta menor comparado con el de las obleas de silicio que requieren 8 g de silicio por vatio [123].

Debido a la enorme reducción del desperdicio de material, los costes de producción son significativamente más baratos, pero el principal inconveniente es la menor eficiencia de la cinta. En la actualidad se ha logrado la fabricación de una cinta de silicio con una eficiencia de 17,8% [124] Estos son los dispositivos de cinta más eficientes realizados hasta la fecha, lo que demuestra la alta calidad de silicio procesado y el futuro potencial de las celdas *Ribbon*.

Tabla 8. Primera Generación



5.2 SEGUNDA GENERACION

Este tipo de celdas solares, también llamada de película delgada (TF por sus siglas en inglés “Thin Film”), surgen como un fuerte contrincante de las tecnologías de fabricación basadas en materiales monocristalinos como el Si y el GaAs. Debido a su naturaleza amorfa o policristalina, este tipo de celdas presentan eficiencias por debajo de las registradas comercialmente; pero a su vez presentan ventajas inherentes de las tecnologías de película delgada, de

las cuales sobresalen su pequeño espesor y bajo peso, lo que las convierte en las candidatas ideales para aplicaciones espaciales, que como recordamos fue el motivo inicial para que se diera todo el desarrollo en este tipo de tecnologías; además hacen uso de materiales abundantes en el ambiente y de menor toxicidad, lo que se ve reflejado en una mayor reducción de costos combinada con un aumento sustancial en la eficiencia del módulo [125].

Los materiales de segunda generación más usados han sido el Telurio de Cadmio (CdTe), Seleniuro de Cobre Indio-Galio (CIGS) [126]; generalmente estos materiales utilizan un sustrato de soporte como vidrio o cerámica, que les permite una reducción de la masa del material, requiere temperaturas no tan elevadas en sus procesos de fabricación.

Para el 2009 el silicio policristalino disminuyó fuertemente sus precios lo que resultó en un aumento masivo en la capacidad de producción del mismo. Así, el silicio cristalino (c-Si) recuperó más del 85% del mercado. Por este motivo, hubo una gran disminución en los precios de los módulos fotovoltaicos basados en Silicio cristalino (c-Si), además, una reestructuración masiva del mercado lo que lleva a la quiebra a varias compañías de tecnologías fotovoltaicas (TF pero también c-Si) hasta la fecha.

Con el fin de competir con las celdas de silicio en términos de coste por vatio se tienen a la vista nuevos conceptos y técnicas de fabricación que pueden ser desarrollados.

5.2.1 Silicio amorfo (a-Si): El Silicio amorfo es la forma no cristalina del Silicio, carece de una disposición definida de átomos en la red, en su forma más simple cuenta con una unión p-i-n, es la más desarrollada de las tecnologías de capa delgada. Un punto importante de esta tecnología es el aprovechamiento que se hace del silicio; ya que durante su elaboración, el silicio monocristalino o el silicio policristalino pierden casi la mitad del silicio en forma de polvo al cortar las placas, esto no ocurre con las celdas fotovoltaicas de silicio amorfo [127].

Pueden ser fabricados a una temperatura de procesamiento baja, permitiendo con ello el uso de diversos polímeros y otros sustratos. Estos sustratos

requieren una menor cantidad de energía para su procesamiento, de manera que le permite absorber mucha más luz que el silicio cristalino; razón por la cual las celdas pueden ser más delgadas y también se ha considerado la aplicación de óxido de silicio a capas absorbentes.

Las simulaciones muestran que en celdas solares de triple unión el intervalo de banda de la celda superior tiene que ser aumentado a aproximadamente 2eV para optimizar la eficiencia [128]. Primeros experimentos muestran resultados prometedores [129], lo que se ha evidenciado es la reducción de pérdidas por absorción parasitaria y tiene el potencial de aumentar el voltaje de circuito abierto.

5.2.2 Telurio de cadmio (CdTe): Cuenta con un semiconductor apilado de forma secuencial sobre una lámina de sustrato de vidrio depositado sobre un óxido conductor transparente (TCO), presenta un bandgap de 1,5 eV así como un coeficiente de absorción óptico alto y una muy buena estabilidad química [130]. En comparación con otros materiales de película delgada, la tecnología de CdTe ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años; es más accesible, ya que es posible fabricar grandes cantidades de celdas solares dentro de un corto período de tiempo.

El teluro de cadmio es la única tecnología de capa fina que posee bajos costos comparada con las celdas solares convencionales de silicio cristalino. Posee un tiempo de retorno energético de menos de un año, permite reducciones de carbono más rápido sin déficit de energía a corto plazo. La toxicidad del cadmio es una preocupación ambiental mitigada por el reciclaje de los módulos de CdTe al final de su tiempo de vida.

El record de eficiencia hasta el momento de para conversión de celdas fotovoltaica (FV) de Telurio de Cadmio (CdTe), fue anunciado por *First Solar.Inc*, el cual estableció un rendimiento del 21%, Certificado en el Laboratorio de Tecnología y Aplicaciones del Centro de la *Newport Corporation* (TAC).

Este resultado certificado supera el anterior récord de CdTe de 20,4 % de eficiencia de conversión, que también había sido fijado por *First Solar* en febrero de 2014 y representa la séptima actualización sustancial de la eficiencia de CdTe desde 2011.

El logro también sitúa la eficiencia de celdas de CdTe de *First Solar* sobre el sobre (CIGS) a 20,9 %, y muy por encima del silicio multicristalino (m-Si), que alcanzó su punto máximo de 20,4% en 2004 [\[131\]](#).

5.2.3 CIGS (Cobre, Indio, Galio Selenio/Azufre): Este tipo de celdas presentan una unión p-n, básicamente están compuestas de un electrodo trasero, una capa absorbente de luz, un semiconductor tipo p ($\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$), una capa buffer, un semiconductor tipo n sulfuro de cadmio (CdS) u oxi-sulfuro de zinc ($\text{Zn}(\text{O,S})$), un contacto frontal formado a su vez por una capa muy delgada de alta resistividad de óxido de zinc (ZnO) y una capa transparente conductora de óxido de zinc.

Las técnicas más exitosas de fabricación tanto en productos de laboratorio como en módulos comerciales son:

- Co-evaporación o sputtering,
- Electrodeposición o printing.

Esta tecnología es apta para ser aplicada no sólo sobre sustratos rígidos (por ejemplo, vidrio) sino también sobre sustratos flexibles (por ejemplo, metales o polímeros) permitiendo la utilización de procesos con altos rendimientos.

Este tipo de celdas de película delgada es una de las más usadas comercialmente con una producción cerca de 1.7 GW en 2014 [\[132\]](#), [\[133\]](#). Las celdas de película delgada CIGS tienen el coeficiente de absorción más alto entre todos los semiconductores para celdas solares y un bandgap directo que varía de 1,02 a 1,67 eV con la incorporación de galio (Ga) [\[134\]](#) La mayor eficiencia de conversión alcanzada en el laboratorio para las celdas solares de película delgada CIGS y los módulos medidos bajo el espectro solar AM1.5 global a 25 ° C es 21.06% y 18.7% [\[135\]](#), respectivamente.

5.2.4 Kesteritas : Las kesteritas son una familia de compuesto que comprende $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS), $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ (CZTSe). Uno de los materiales más prometedores en la aplicación de celda solar fotovoltaica, su principal característica es el hecho de estar compuesto por materias prima abundante en la naturaleza, menos toxicas y de bajo costo. Su bandgap está entre 1.0 - 1.5 eV, ideales para aplicaciones fotovoltaicas [136] [137].

La relación entre los diferentes elementos del compuesto $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ durante los procesos de síntesis, le permite ser muy utilizada en aplicaciones en celdas solares como capa absorbente.

Por lo anterior, la identificación del tipo de estructura cristalina del CZTSe es de gran importancia en la determinación de propiedades tanto electroquímicas como estructurales del mismo. El compuesto CZTSe se puede cristalizar en estructuras tipo estannita o kesterita, que provienen de la familia tetragonal y es básicamente una estructura de doble blenda de Zinc. La mayor parte de sus reflexiones están en la misma posición que las fases binarias, ternarias y del compuesto cuaternario CTZSe [138].

El record de eficiencia de este tipo de celdas es de 12,6% $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_x\text{Se}_{4-x}$ (CZTSSe) [139], como se muestra en la figura 24. Tanto la densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc}) como la tensión de circuito abierto (V_{oc}) aumentan lograron incrementos importantes, en comparación con los dispositivos anteriores, debido a una mejor calidad de CZTSSe y a una mejor arquitectura óptica.

Figura 24. Estructura Kesterita $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}/\text{Se})_4$

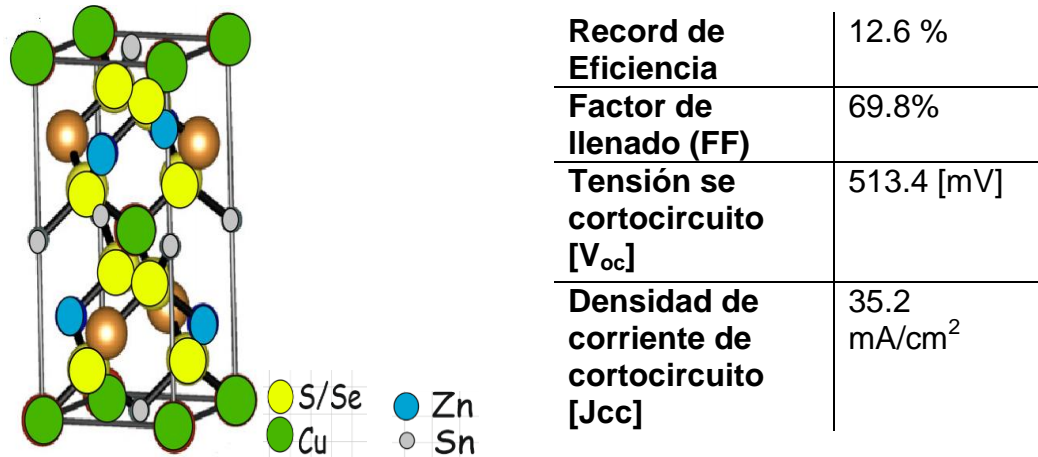


Tabla 9. Segunda Generación



5.3 TERCERA GENERACIÓN

El concepto de tecnologías de tercera generación se centra en aumentar la eficiencia de los dispositivos, manteniendo al mismo tiempo las ventajas económicas y ambientales. Además, en común con las tecnologías de película

delgada de segunda generación basadas en silicio, éstas utilizarán materiales abundantes y no tóxicos [140].

La Tercera generación de celdas solares incluye una gama de alternativas hechas de uniones entre semiconductores ("primera generación") y celdas de película delgada ("segunda generación"). Muestran un gran potencial con eficiencias de registro más allá del 20% para un área muy pequeña [141]. Algunos de los conceptos de tercera generación más interesantes discutidos durante los últimos 30 años incluyen; sistemas multijunturas tales como las celdas tándem, el uso de puntos cuánticos para mejorar la absorción, el uso de colectores fluorescentes y el impacto de la ionización por utilizar la energía cinética de los portadores.

Si se puede aumentar sustancialmente la eficiencia mediante la tecnología avanzada de "tercera generación", se pueden obtener precios globales mucho más bajos incluso si hay un aumento moderado en los costos de procesamiento de superficie, en relación con los enfoques de segunda generación.

Aunque el rendimiento y la estabilidad de las celdas solares de tercera generación siguen siendo limitados en comparación con las celdas solares de primera y segunda generación, tienen un gran potencial. Se prevé que el principal crecimiento relativo hasta 2020 estará cubierto por estas tecnologías y para 2030 nuevas tecnologías tomarán la iniciativa [142].

5.3.1 Celdas sensibilizadas (TiO_2): Una alternativa a la celda solar del estado sólido es el uso de una celda fotoelectroquímica. Hasta la fecha, las celdas más exitosas de este tipo son las sensibilizadas por tinte desarrolladas por Gratzel y sus compañeros de trabajo, que ahora se conoce comúnmente como "celdas de Gratzel". Con este dispositivo, el electrodo superior se hace mediante serigrafía de una capa de TiO_2 sobre vidrio revestido con SnO_2 dopado con flúor y un colorante aplicado al TiO_2 [143]

La superficie del TiO_2 es muy rugosa para aumentar el área superficial y para mejorar la absorción de la luz. El colorante generalmente consiste en una

transición compleja de metal basado en rutenio u osmio. El dispositivo se completa añadiendo un electrolito adecuado (normalmente una solución basada en yodo) entre los electrodos y sellando los bordes para evitar el escape del electrolito [144]. El principal limitante de este tipo de tecnología es la pobre absorción óptica de la región cercana al infrarrojo, esto se ve reflejado en una baja eficiencia de conversión.

Se ha realizado un estudio detallado de la estabilidad a largo plazo de estos dispositivos y se ha confirmado que la eficiencia es del 8,2% para un área de celda de 2,36 cm² y un 4,7% para un sub-módulo de área 141,4 cm². También se ha informado una eficiencia del 11% para un dispositivo de área de 0,25 cm² [145]. Aunque estas celdas son en principio baratas para producir, todavía no está claro dónde y qué tan bien competirán con las tecnologías de celdas convencionales

5.3.2 Celdas orgánicas : En 1985 primera vez Ching Tang demostró una celda completamente orgánica preparado por el pigmento de perileno se combina con ftalocianina de cobre (CuPc) con una eficiencia de 1% [146]. A mediados de 1990 Messiner obtuvo otra celda solar orgánica basado en una estructura de Fullerenos (C-60) dopado con una capa APZn con una eficiencia superior al 1% [147]. Los materiales orgánicos que son de mayor interés son los semiconductores moleculares, poliméricos, el fullereno (C60) y sus derivados. La estructura de estas celdas comienza con un sustrato de vidrio recubierto con óxido de estaño indio que también actúa como el electrodo superior transparente al dispositivo. Se deposita una capa (o capas) de material orgánico absorbente de luz (o materiales) sobre óxido de indio estaño. El dispositivo se completa depositando un contacto posterior (normalmente un metal) sobre el material orgánico. Las ventajas potenciales del uso de estos materiales incluyen la sencillez de los procesos de deposición que pueden usarse. Muchos de los materiales son procesables en solución de tal manera que es posible el revestimiento por centrifugación de sustratos

Recientemente, Alan Heeger y su colega Kwanghee lee han desarrollado celdas solares orgánicas con una estructura tándem, basadas en compuestos

de polímero-fullereno con eficiencia energética del 6,5% [148]. Si este tipo de dispositivos se pueden desarrollar o no, a gran escala es el mayor desafío para la investigación en esta área en el futuro.

5.3.3 Celdas inorgánicas: El interés en los materiales inorgánicos proviene de su amplia absorción espectral, altas movilidad de los portadores y mayor estabilidad. El funcionamiento de una celda solar inorgánica se describe a continuación [149]:

1. Absorción de fotones por la celda solar
2. Generación de electrones y huecos libres, en este paso se da la termalización de ellos en la banda de conducción y de valencia.
3. Los electrones y huecos libres son llevados a la unión p-n para ser colectados por los electrodos que se encuentran en los materiales n y p.

La incorporación de muchos materiales inorgánicos en dispositivos solares comercializables sigue estando obstaculizada por la eficiencia, la fiabilidad y la métrica general de rendimiento del precio por vatio. A medida que se buscan formas de hacer un impacto dramático en el costo de la fabricación de dispositivos fotovoltaicos, los enfoques de procesamiento de soluciones llegan a la vanguardia en términos de versatilidad y escalabilidad [150]

5.3.4 Híbridos perovskita : Este tipo de celda solar considerada sobresaliente, representa una tecnología de celdas de bajo costo, la cual posee importantes características para ser utilizada como capa absorbente, debido a que este tipo de compuesto es altamente cristalino con una capacidad de absorción sobre un amplio rango espectral, desde las longitudes de onda visibles hasta casi infrarrojas (cerca de IR) (350 a 950 nm), la perovskita específica que presentamos es cloruro de yoduro de metilamonio ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_2\text{Cl}$) [151].

Para el caso de la celda solar (Perovskita del yoduro de Formamidinium, yoduro de la ventaja de Formamidinium) FAPbI_3 [152], su record de eficiencia de conversión se encuentra 22.1 %, es el resultado de la evolución de su predecesor (celdas sensibilizadas por colorantes) y han experimentado un progreso pronunciada en términos de eficiencia de conversión de potencia a partir de 3,8% en 2009 y alcanzar el 22.1 % en 2015 [153].

Las perovskitas tienen propiedades de transporte de carga ambipolar, es decir conducen tanto electrones como huecos, son de bandgap directo el cual varia en un rango de 1.2 a 2.3 [eV], dependiendo de su composición.

De esta forma las celdas solares de perovskita han despertado el interés en su investigación, logrando eficiencias de conversión muy buenas, debido a nuevas estructuras y métodos de fabricación desarrollados, en la tabla 10; se presentan algunas de las estructuras más sobresalientes de Perovskitas con diferentes que describen el rendimiento del dispositivo, el voltaje en circuito abierto (V_{OC}), la densidad de corriente en cortocircuito (J_{SC}) y el factor de llenado (FF) [154].

Tabla 10. Configuraciones y principales características para los diferentes compuestos en celdas solares de perovskita [155].

Materiales	Configuración de la celda	J_{sc} [mA/cm ²]	V_{oc} [V]	FF	PCE
	mp-TiO ₂ /MAPbI ₃ /spiro-MeOTAD	17.6	0.888	0.62	9.7
	MAPbI ₃ /PCBM	10.32	0.6	0.63	3.9
MAPbI ₃	ZnOnanorod/MAPbI ₃ /spiro-MeOTAD	16.98	1.02	0.51	8.9
	mp-TiO ₂ /MAPbI ₃ /PTAA	16.5	0.997	0.727	12
	mp-TiO ₂ /MAPbI ₃ (2-step)/spiro-MeOTAD	20	0.933	0.73	15
	mp-TiO ₂ /MAPbI ₃ cuboid/spiro-MeOTAD	21.64	1.056	0.741	17.01
	mp-Al ₂ O ₃ /MAPbI ₃ -xClx/spiro-MeOTAD	17.8	0.98	0.63	10.9
MAPbI ₃ -xClx	MAPbI ₃ -xClx/P3HT	20.8	0.921	0.542	10.4
	MAPbI ₃ (evap)/spiro-MeOTAD	21.5	1.07	0.67	15.4
	bi-Y-TiO ₂ /MAPbI ₃ -xClx(solution)/spiro-MeOTAD	22.75	1.13	0.75	19.3
MAPbBr ₃	mp-TiO ₂ /MAPbBr ₃ /PCBTDP	4.47	1.16	0.59	3.04
	mp-Al ₂ O ₃ /MAPbBr ₃ /PDI	1.08	1.3	0.4	0.56
	mp-TiO ₂ /MAPbBr ₃ /PIF8-TAA	6.1	1.4	0.79	6.7
FAPbI ₃	mp-TiO ₂ /FAPb ₃ /spiro-MeOTAD	6.45	0.97	0.687	4.3
	FAPb ₃ /spiro-MeOTAD	23.3	0.94	0.65	14.2
	mp-TiO ₂ /FAPb ₃ MAPbI ₃ (ETL)/spiro-MeOTAD	20.97	1.032	0.74	16.01

En el camino a una alta eficiencia, se ha hecho un gran esfuerzo en cuanto a la deposición de película de perovskita, optimización de la estructura y la manipulación de la interfaz.

Tabla 11. Tercera Generación



6. CONCLUSIONES

- Los resultados en este trabajo son de valiosa importancia, pues presentan una recopilación de las diferentes técnicas de fabricación de celdas solares y las generaciones propuestas por Martin Green, de manera que se convierte en una base fundamental para su consideración en la fabricación de dispositivos por parte del semillero de investigación SIMART.
- En base a la información recolectada, la estructura CZTS está compuesta de materiales que son abundantes en la tierra, de bajo costo y no tóxicos. Actualmente ha logrado alcanzar una eficiencia de 12,6%, lo que la convierte en una alternativa ideal, por su gran potencial, para reemplazar las celdas solares actuales.
- Las celdas tándem tienen la ventaja de la selección automática de la banda apropiada de fotones para cada celda, pero también tienen que ser ajustados para un espectro particular, lo que las hace vulnerables a los cambios espectrales.
- Las celdas de tipo electroquímicas, como las sensibilizadas con colorantes o TiO_2 , quedaron suspendidas por problemas como la rápida degradación del material. Esto influyó en el alcance de mejores eficiencias.
- Nuevas tecnologías siguen desarrollándose, como el caso de las celdas solares de puntos cuánticos, gracias a su progreso, han logrado pasar de modelos teóricos a modelo físico. Se encuentran en investigación gracias a su gran capacidad de conversión de potencia en dispositivos. Si bien no hacen parte de este trabajo, debido a la gran cantidad de tecnologías emergentes; la resaltamos como una tecnología con mucho potencial en desarrollo.
- Se logró identificar que las celdas con perovskitas en sus diferentes configuraciones presentan propiedades muy interesantes, debido a su naturaleza robusta (no se degrada con facilidad), procesos de fabricación

menos costosos que permiten un avance en términos de reproducibilidad, además abre la posibilidad a la incorporación de nuevos materiales, como Li, Na, K y Rb.

- A pesar de las múltiples investigaciones realizadas en el área de celdas solares, el Silicio sigue siendo tendencia; por esta razón muchas de las instalaciones de producción continúan usándolo como materia prima para el desarrollo de celdas solares.
- Durante el desarrollo de este proyecto, se pudieron encontrar numerosas tecnologías y materiales listos para revolucionar la industria fotovoltaica, debido al auge que ha tenido en los últimos años el tema de las celdas solares.
- El mercado de energía fotovoltaica (FV) ha estado creciendo debido a los objetivos del gobierno para la producción de energía renovable y la reducción de emisiones de CO₂, razón por la cual la Agencia Internacional de Energía ha dicho que la energía solar podría ser la mayor fuente de electricidad del mundo en 2050.

REFERENCIAS

- [1] Renewables Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat). ISBN 978-3-9818107-0-7. Disponible En Línea: [Http: www.Ren21.Net /WpContent/Uploads/ 2016/ 06 / GSR_2016_Full_Report_REN21.Pdf](http://www.Ren21.Net/WpContent/Uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report_REN21.Pdf), p (62) Consulta: Julio 27 Del 2016
- [2] BDH.Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie. *Página consultada en la web el* septiembre 2016 <http://www.bdh-koeln.de/presse/pressemitteilungen/artikel///dynamisches-wachstum-in-2015-deutsche-heizungsindustrie-zieht-jahresbilanz.html>
- [3] Integración De Las Energías Renovables No Convencionales En Colombia, UPME,ISBN No. 978-958-8363-26-4. Bogotá 2015. p (40-41)
- [4] Escenarios y Estrategias, Minería Energía, Unidad de Planeación Minero Energética, No.9, Bogotá Marzo de 2006. p (22).
- [5] UPME, IDEAM. Atlas de Radiación solar de Colombia. Santafé de Bogotá DC: Unidad de Planeación Minero Energética, Ministerio de Minas y Energía, 2005.
- [6] BELTRÁN GÓMEZ, Lady Viviana, et al. Análisis de los diferentes tipos de energías alternativas y su implementación en Colombia. 2016. Tesis de Licenciatura. Universidad Militar Nueva Granada.
- [7] GREENPEACE, Solar SPACES. ESTELA. 2009. *Energía Solar Térmica de Concentración*, 2009.
- [8] Ley 1715 Del 2014, “Por Medio de La cual se Regula La Integración De Las Energías Renovables No Convencionales Al Sistema Energético Nacional”. Disponible en Línea: http://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf
- [9] ZARZA MOYA, Eduardo, et al. Generación directa de vapor con colectores solares cilindro parabólicos Proyecto Direct Solar Steam (DISS). 2003.
- [10] HUMBERTO RODRÍGUEZ MURCIA, Desarrollo de la Energía Solar en Colombia y sus Perspectivas, 2009.
- [11] A. L. a. S. Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons, Ltd, 2003.
- [12] Zweibel, K., & Hersch, P. Basic photovoltaic principles and methods. Van Nostrand Reinhold Company 1982.

- [13] RASERO, Carlos Montoya. Energía solar fotovoltaica. 2000.
- [14] GORDILLO, Gerardo. Conversión fotovoltaica de la energía solar. Rev. Acad. Colomb. Cienc, 1998, vol. 22, no 83, p. 203-211.
- [15] Subba Ramaiah Kodigala, Thin Films and Nanostructures Cu(In_{1-x}Gax)Se₂ Based Thin Film Solar Cells, Department of Physics & Astronomy California State University, Volume 35, pp (10) 2010.
- [16] KITAI, Principles of Solar Cells, LEDs and Diodes, John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [17] SMITH, Willoughby. The action of light on selenium. Journal of the Society of Telegraph Engineers, 1873, vol. 2, no 4, p. 31-33.
- [18] OVIEDO-SALAZAR, J. L., et al. Historia y Uso de Energías Renovables History and Use of Renewable Energies. Daena: International Journal of Good Conscience, 2015, vol. 10, no 1, p. 1-18.
- [19] URBANO, Janett Barbosa, et al. Estudio para el uso de la tecnología solar fotovoltaica. Ingeniería solidaria, 2011, vol. 6, no 10-11, p. 69-81.
- [20] TOMASZEWSKI, Paweł E. Jan Czochralski—father of the Czochralski method. Journal of crystal growth, 2002, vol. 236, no 1, p. 1-4.
- [21] SARLEMIJN, A.; KROES, P. Innovation and basic research in the industrial laboratory: the repeater, transistor and Bell Telephone System. Between Science and Technology, 2012, p. 181.
- [22] Zweibel, K., & Hersch, P. (1982). Basic photovoltaic principles and methods. Van Nostrand Reinhold Company.
- [23] CHAPIN, Daryl M.; FULLER, C. S.; PEARSON, G. L. A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. Journal of Applied Physics, 1954, vol. 25, no 5, p. 676-677.
- [24] APS NEWS APRIL 25, 1954 Bell Labs Demonstrates the First Practical Silicon Solar Cell. *Página consultada en la web* Septiembre 2016. <http://www.aps.org/publications/apsnews/200904/physicshistory.cfm>.
- [25] UNITED STATES PATENT OFFICE , Light Sensitive Electric Device , Russell S. OHL, Little Silver, N.J., assignor to Bell Telephone Laboratories, Incorporated, New York, N.Y; a corporation of New York, Serial No. 395,410, June 25 of 1.946.

- [26] HWANG, H. L., et al. Application of luminescence in studies of photovoltaic properties of Cu-Cd-S solar cells. *Journal of Crystal Growth*, 1982, vol. 59, no 1-2, p. 425-431.
- [27] BOGADO, MG Martínez. Diseño, elaboración, caracterización y ensayos de dispositivos fotovoltaicos para usos espaciales. 2004. Tesis Doctoral. Tesis de doctorado, Universidad Nacional de General San Martín, Argentina.
- [28] Green, M. A. (2009). The path to 25% silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 17(3), 183-189
- [29] BARRERA, Manuel Fernández. *Energía solar: Electricidad fotovoltaica*. Editorial Liber Factory, 2010.
- [30] FRAAS, Lewis M.; ZANIO, Kenneth R.; KNECHTLI, Ronald C. Multijunction gallium aluminum arsenide-gallium arsenide-germanium solar cell and process for fabricating same. U.S. Patent No 4, 128,733, 5 Dic. 1978.
- [31] MATSUMOTO, Yasuhiro; DEL ESTADO SÓLIDO, Sección de Electrónica. *Celdas Solares de Silicio: Fundamento y Tendencia*. Div. Ciencias e Ing. Univ. Quintana Roo, 2011, p. 44.
- [32] TOHODA, Satoshi, et al. Future directions for higher-efficiency HIT solar cells using a Thin Silicon Wafer. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2012, vol. 358, no 17, p. 2219-2222.
- [33] SE4ALL. Sustainable energy for all. *Página consultada en la web* Septiembre 2016. <http://www.se4all.org/>
- [34] GARCÉS, Pablo. *Energía Sostenible–Perspectiva Regional: Centroamérica–América Latina y El Caribe*. Seminario Regional de Capacitación para América Central (SICA-OLADE), Costa Rica, 2013.
- [35] ABERLE, Armin G. Surface passivation of crystalline silicon solar cells: a review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2000, vol. 8, no 5, p. 473-487.
- [36] SHOCKLEY, William; QUEISSER, Hans J. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *Journal of applied physics*, 1961, vol. 32, no 3, p. 510-519.
- [37] GARCÉS PINEDA, Felipe Andrés. *Estudio de las estructuras silicio poroso/óxidos conductores transparentes*. 2013. Tesis Doctoral.

- [38] FISICA DE LA UNION p-n. Tema 3: Física de la unión p-n. *Página consultada en la web* noviembre 2016 [http://www.uv.es/candid/docencia/Tema3\(01-02\).pdf](http://www.uv.es/candid/docencia/Tema3(01-02).pdf).
- [39] SHACKELFORD, James F., et al. Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros. Pearson:, 2010.
- [40] EFECTO HALL. *Consultada en la web* noviembre 2016. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/Hall.html>.
- [41] PRAT VIÑAS, Lluís; CALDERER CARDONA, Josep. Dispositivos electrónicos y fotónicos: fundamentos. 2003.
- [42] NIVEL DE FERMI. *Consultada en la web* noviembre 2016. <https://es.scribd.com/doc/151429966/La-Energia-de-Fermi-en-Los-Semiconductores-Intrinsecos>.
- [43] CANDAL, R.; BILMES, Sara A.; BLESA, Miguel A. Semiconductores con actividad fotocatalítica. en Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea. M. Blesa, Ed. La Plata (Argentina): CYTED, 2001, p. 79-10
- [44] Botero Londoño Mónica Andrea, Tesis de Doctorado, Síntesis y Caracterización de Nuevos Materiales no Tóxicos empleados Como capa Buffer y Capa Absorbente en la fabricación de Celdas Solares, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Física, 2008.
- [45] GUREVICH, Yuri; LIRA, G. Miguel Meléndez. Fenómenos de contacto y sus aplicaciones en celdas solares. Fondo de Cultura Economica, 2013.
- [46] MEDINA DE PRÓCEL, Margarita. Estudio de sistemas fotovoltaicos como fuente renovable de energía. 1994. Tesis Doctoral. Quito: EPN, 1994.
- [47] Bube, R. H., & Bube, R. H... *Photovoltaic materials* (Vol. 1). Amsterdam: Imperial College Press. 1998
- [48] DEMAUREX, Bénédicte. Passivating contacts for homojunction solar cells using a-Si: H/c-Si hetero-interfaces. 2014. Tesis Doctoral. ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE.
- [49] Würfel, P., & Würfel, U. (2009). Pp (131). Physics of solar cells: from basic principles to advanced concepts. John Wiley & Sons.
- [50] BRODSKY, Marc H. Avances en semiconductores de arseniuro de galio. Investigación y ciencia, 1990, no 163, p. 58-67.
- [51] STREICHER, Morgana. Crescimento e caracterização de cristais de GaSb e GaInSB obtidos através do método Czochralski com líquido encapsulante.

2011. Tesis de Maestría. Pontificia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

[52] Conference: World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, At Waikaloa, HI, Volume: 1. 24% EFFICIENT SILICON SOLAR CELLS. Consultada en la web noviembre 2016. https://www.researchgate.net/publication/3657453_24_Efficient_silicon_solar_cells

[53] ZHAO, J. Passivated emitter rear locally diffused solar cells. Bulletin of advanced technology research, 2011, vol. 5, no 8.

[54] PLÁ, J.; DURÁN, Julio César; SOLAR, Grupo Energía. Tratamientos superficiales antirreflectantes y elaboración de juntas para celdas solares de silicio cristalino. 1998. Tesis Doctoral. Tesis Doctoral.

[55] MATSUMOTO, Yasuhiro; DEL ESTADO SÓLIDO, Sección de Electrónica. Celdas Solares de Silicio: Fundamento y Tendencia. Div. Ciencias e Ing. Univ. Quintana Roo, 2011, p. 44.

[56] ZHAO, Jianhua; WANG, Aihua; GREEN, Martin A. High-efficiency PERL and PERT silicon solar cells on FZ and MCZ substrates. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2001, vol. 65, no 1, p. 429-435.

[57] ZHAO, Jianhua; WANG, Aihua. Rear emitter n-type passivated emitter, rear totally diffused silicon solar cell structure. Applied physics letters, 2006, vol. 88, no 24, p. 242102.

[58] CHO, Jinyoun, et al. 21%-Efficient n-type Rear-junction PERT Solar Cell with Industrial Thin 156mm Cz Single Crystalline Silicon Wafer. Energy Procedia, 2015, vol. 77, p. 279-285.

[59] KODIGALA, Subba Ramaiah. *Cu (In_{1-x}Gax) Se₂ Based thin film solar cells*. Academic Press, 2011.p.p (10-12).

[60] DE LOS SEMICONDUCTORES, ESTRUCTURA DE BANDAS. FUNDAMENTOS FISICOS DE LAS CELDAS SOLARES. Página consultada en la web el, Noviembre 2016: http://paginas.fisica.uson.mx/horacio.munquia/aula_virtual/Cursos/Electronica/Documentos/Celdas_Solares1.pdf

[61] LIU, Mingzhen; JOHNSTON, Michael B.; SNAITH, Henry J. Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition. Nature, 2013, vol. 501, no 7467, p. 395-398.

- [62] BRABEC, Christoph J., et al. Polymer–fullerene bulk-heterojunction solar cells. *Advanced Materials*, 2010, vol. 22, no 34, p. 3839-3856.
- [63] YU, Gang, et al. Polymer photovoltaic cells: Enhanced efficiencies via a network of internal donor-acceptor heterojunctions. *Science*, 1995, vol. 270, no 5243, p. 1789.
- [64] W.Fuchs, K. Niemann and J. Stuke, *AIP Conf. Proc.* 20, 345 (1974).
- [65] PANASONIC CORPORATION. Página consultada en la web el, octubre 2016: <https://eu-solar.panasonic.net/en/panasonic-hit-sanyo-history.htm>
- [66] DE WOLF, Stefaan, et al. High-efficiency silicon heterojunction solar cells: a review. *Green*, 2012, vol. 2, no 1, p. 1-18.
- [67] MONTESES, Julio Joffre Barzola. Eficiencia de una celda solar común y su comparación con celdas de tecnología HIT. *Revista Tecnológica-ESPOL*, 2013, vol. 26, no 2.
- [68] MISHIMA, Takahiro, et al. Development status of high-efficiency HIT solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, vol. 95, no 1, p. 18-21.
- [69] MASUKO, Keiichiro, et al. Achievement of more than 25% conversion efficiency with crystalline silicon heterojunction solar cell. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2014, vol. 4, no 6, p. 1433-1435.
- [70] Panasonic HIT[®] Solar Cell Achieves World's Highest Energy Conversion Efficiency of 25.6%^{*2} at Research Level. Disponible en: <http://news.panasonic.com/global/press/data/2014/04/en140410-4/en140410-4.html>
- [71] S.R.Wenham.M.A.Green,"Buried contact solar cell",US Patent US 4,726,85, 1988.
- [72] Jooß, W. (2002). Capítulo 1. *Multicrystalline and back contact buried contact silicon solar cells* (Doctoral dissertation).
- [73] Zolper, J. C., Narayanan, S., Wenham, S. R., & Green, M. A. (1989). 16.7% efficient, laser textured, buried contact polycrystalline silicon solar cell. *Applied Physics Letters*, 55(22), 2363-2365.
- [74] PAVEL, Akeed Ahmed; KHAN, M. Rezwana. Enhancing efficiency of a heteroface solar cell. En *Electron Devices*, 2005 Spanish Conference on. IEEE, 2005. p. 263-266.
- [75] JOOß, Wolfgang. Multicrystalline and back contact buried contact silicon solar cells. 2002. Tesis Doctoral.

- [76] JORDAN, D.; NAGLE, J. P. Buried contact concentrator solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 1994, vol. 2, p. 171-176.
- [77] WOHLGEMUTH, J. H.; NARAYANAN, S. Buried contact concentrator solar cells. En *Photovoltaic Specialists Conference, 1991.*, Conference Record of the Twenty Second IEEE. IEEE, 1991. p. 273-277.
- [78] HLAWICZKA, Paul. *Introducción a la electrónica cuántica*. Reverté, 1977.
- [79] PILIEGO, Claudia, et al. 5.2% efficient PbS nanocrystal Schottky solar cells. *Energy & Environmental Science*, 2013, vol. 6, no 10, p. 3054-3059.
- [80] GUREVICH, Yuri; LIRA, G. Miguel Meléndez. Fenómenos de contacto y sus aplicaciones en celdas solares. Fondo de Cultura Económica, 2013. pp104-121
- [81] TIPLER, Paul A.; LLEWELLYN, Ralph. *Modern physics*. Macmillan, 2003
- [82] FONASH, Stephen. *Solar cell device physics*. Elsevier, 2012.
- [83] LUTHER, Joseph M., et al. Schottky solar cells based on colloidal nanocrystal films. *Nano letters*, 2008, vol. 8, no 10, p. 12.
- [84] TANG, Jiang, et al. Schottky quantum dot solar cells stable in air under solar illumination. *Advanced materials*, 2010, vol. 22, no 12, p. 1398-1402.
- [85] PILIEGO, Claudia, et al. 5.2% efficient PbS nanocrystal Schottky solar cells. *Energy & Environmental Science*, 2013, vol. 6, no 10, p. 2-23.
- [86] VILAMITJANA, David Soler; SERRA, Enric Bertrán. *Amorphous silicon solar cells obtained by Hot-Wire Chemical Vapour Deposition*. Universitat de Barcelona, 2004.
- [87] SPRINGER, J., et al. Light trapping and optical losses in microcrystalline silicon pin solar cells deposited on surface-textured glass/ZnO substrates. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2005, vol. 85, no 1, p. 1-11.
- [88] MEIER, J., et al. Complete microcrystalline p-i-n solar cell—Crystalline or amorphous cell behavior?. *Applied Physics Letters*, 1994, vol. 65, no 7, p. 860-862.
- [89] RINALDI, Pablo Andrés. *Propiedades ópticas y estructurales del silicio amorfo hidrogenado con diversos grados de cristalinidad*. 2012. Tesis Doctoral.
- [90] PAUL, William; ANDERSON, David A. Properties of amorphous hydrogenated silicon, with special emphasis on preparation by sputtering. *Solar Energy Materials*, 1981, vol. 5, no 3, p. 229-316.

- [91] LÓPEZ, Fernando Villar. Dispositivos fotovoltaicos de capa delgada a baja temperatura. Universitat de Barcelona, 2010.
- [92] SWANSON, Richard M., et al. Point-contact silicon solar cells. IEEE Transactions on Electron Devices, 1984, vol. 31, no 5, p. 661-664.
- [93] DE VECCHI, S., et al. Point contacts technology for silicon heterojunction solar cells. Energy Procedia, 2012, vol. 27, p. 549-554.
- [94] BENITEZ, P., et al. Ultra-High Efficiency, High-Concentration PV System Based On Spectral Division Between GaInP/GaInAs/Ge And BPC Silicon Cells. En DIMROTH, Frank (ed.). AIP Conference Proceedings. AIP, 2011. p. 1-4.
- [95] KERSCHAUER, Emmanuel Van; BEAUCARNE, Guy. Back-contact solar cells: A review. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2006, vol. 14, no 2, p. 107-123.
- [96] KERSCHAUER, Emmanuel Van; BEAUCARNE, Guy. Back-contact solar cells: A review. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2006, vol. 14, no 2, p. 107-123.
- [97] LICHT, Stuart. Photoelectrochemical solar energy storage cells. Encyclopedia of Electrochemistry, 2002.
- [98] SOSA, José Antonio Gordillo, et al. Ciencias de la Ingeniería y Tecnología Handbook T-IV: Congreso Interdisciplinario de Cuerpos Académicos. 2014.
- [99] GRÄTZEL, Michael. Photoelectrochemical cells. Nature, 2001, vol. 414, no 6861, p. 338-344.
- [100] MADRIZ, Lorean, et al. Celdas solares fotoelectroquímicas basadas en Bi₂WO₆. Quim. Nova, 2014, vol. 37, no 2, p. 226-231.
- [101] LEVY, Michael Y. Maturity of Photovoltaic Solar-Energy Conversion. INTECH Open Access Publisher, 2011.p.10-12.
- [102] DUBÉ, MC Inti Zumeta. Estudio de capas nanoestructuradas de TiO₂ para celdas fotoelectroquímicas.
- [103] BARRERA, Marcela P. Simulación y caracterización de celdas solares multijuntura y de silicio cristalino para aplicaciones espaciales. 2009. Tesis Doctoral. Tesis de doctorado, Universidad Nacional de General San Martín, Argentina.
- [104] ARCHER, Mary D.; GREEN, Martin A. (ed.). Clean electricity from photovoltaics. World Scientific, 2014.p.349-355.

- [105] CÉSPEDES, Jorge Enrique Salamanca. CELDAS FOTOVOLTAICAS DE ALTA EFICIENCIA Y SISTEMA DE PANELES SOLARES DEL CUBESAT COLOMBIA 1. *Redes de Ingeniería*, 2013, vol. 3, no 2, p. 41-50.
- [106] TORCHYNSKA, T. V.; POLUPAN, G. High efficiency solar cells for space applications. *Superficies Vacio*, 2004, vol. 17, no 3, p. 21-25.
- [107] DIMROTH, Frank, et al. Four-junction wafer-bonded concentrator solar cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2016, vol. 6, no 1, p. 343-349.
- [108] WOJTCZUK, Steven J., et al. Method of fabricating bifacial tandem solar cells. U.S. Patent No 8,852,994, 7 Oct. 2014.
- [109] SASAKI, Kazuaki, et al. Development of InGaP/GaAs/InGaAs inverted triple junction concentrator solar cells. En DIMROTH, Frank; ARAKI, Kenji; ANTÓN, Ignacio (ed.). *AIP Conference Proceedings*. AIP, 2013. p. 22-25.
- [110] TIWARI, Gopal Nath; DUBEY, Swapnil. Fundamentals of photovoltaic modules and their applications. Royal Society of Chemistry, 2010.p.112-114.
- [111] DIMROTH, Frank; KURTZ, Sarah. High-efficiency multijunction solar cells. *MRS bulletin*, 2007, vol. 32, no 03, p. 230-235.
- [112] SHARMA, Shruti; JAIN, Kamlesh Kumar; SHARMA, Ashutosh. Solar cells: in research and applications—a review. *Materials Sciences and Applications*, 2015, vol. 6, no 12, p. 1145-1155.
- [113] MASUKO, Keiichiro, et al. Achievement of more than 25% conversion efficiency with crystalline silicon heterojunction solar cell. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2014, vol. 4, no 6, p. 1433-1435.
- [114] ZHANG, Shu, et al. 335-W world-record p-type monocrystalline module with 20.6% efficient PERC solar cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2016, vol. 6, no 1, p. 145-152.
- [115] BALASUBRAMANIAN, AMA Banupriya; ARIFFIN, A. M. Current State-of-the-Art Solar Photovoltaic (PV) Technologies. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2014, vol. 8, no 6, p. 455-468.
- [116] ABERMANN, Stephan. Non-vacuum processed next generation thin film photovoltaics: towards marketable efficiency and production of CZTS based solar cells. *Solar Energy*, 2013, vol. 94, p. 37-70.
- [117] FILLALI, Laila. Síntesis y caracterización microestructural de alúminas obtenidas a partir de un precursor no convencional. 2015. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.

[118] RAMÍREZ, Jaime. Inteligencia tecnológica como herramienta para la diversificación y sofisticación productiva: el caso del grafeno. 2015

[119] MORENO, Mario, et al. DEVELOPMENT OF A FABRICATION PROCESS OF C-SI SOLAR CELLS TOWARDS A OWN TECHNOLOGY OF HIGH EFFICIENCY AND LARGE AREA.

[120] WORLD'S HIGHEST CONVERSION EFFICIENCY OF 26.33% ACHIEVED IN A CRYSTALLINE SILICON SOLAR CELL. Página consultada en la web diciembre 2016: http://www.kaneka.co.jp/kaneka-e/images/topics/1473811995/1473811995_101.pdf

[121] ZHANG, Shu, et al. 335-W world-record p-type monocrystalline module with 20.6% efficient PERC solar cells. IEEE Journal of Photovoltaics, 2016, vol. 6, no 1, p. 145-152.

[122] ALCÁNTARA, Salvador Ponce. Células solares de silicio: Fundamentos y Aplicaciones. Malaga, España, 2008.

[123] HAHN, Giso; SCHÖNECKER, Axel. New crystalline silicon ribbon materials for photovoltaics. Journal of Physics: Condensed Matter, 2004, vol. 16, no 50, p. R1615.

[124] KIM, Dong Seop, et al. String ribbon silicon solar cells with 17.8% efficiency. En Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of 3rd World Conference on. IEEE, 2003. p. 1293-1296.

[125] ABOU-RAS, Daniel; KIRCHARTZ, Thomas; RAU, Uwe (ed.). *Advanced characterization techniques for thin film solar cells*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2011.

[126] HIRSHMAN, William P.; HERING, Garret; SCHMELA, Michael. Cell and module production 2007. *Photon International*, 2008, vol. 152.

[127] BALASUBRAMANIAN, AMA Banupriya; ARIFFIN, A. M. Current State-of-the-Art Solar Photovoltaic (PV) Technologies. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2014, vol. 8, no 6, p. 1-8.

[128] WALDER, Cordula, et al. Amorphous silicon oxinitride in silicon thin-film solar cells. Energy Procedia, 2014, vol. 44, p. 1-6

[129] INTTHISANG, Sorapong, et al. Hydrogenated amorphous silicon oxide solar cells fabricated near the phase transition between amorphous and microcrystalline structures. Japanese Journal of Applied Physics, 2009, vol. 48, no 12R.

[130] LÓPEZ, J. A. Desarrollo de una tecnología de dopado tipo n en telururo de cadmio y mercurio mediante técnicas de implantación iónica y recocidos térmicos rápidos. 1995. Tesis Doctoral. Tesis Doctoral. Departamento de Tecnología Electrónica, UPM.

[131] First Solar Press Release. First solar builds the highest efficiency thin film PV cell on record, 5 August 2014. Página web consultada en Diciembre 2016. [http://files.shareholder.com/downloads/FSLR/0x0x773989/5f8cc8fe-7d05-4c4d-b8e8-78206cede53d/FSLR News 2014 8 5 English.pdf](http://files.shareholder.com/downloads/FSLR/0x0x773989/5f8cc8fe-7d05-4c4d-b8e8-78206cede53d/FSLR_News_2014_8_5_English.pdf)

[132] MEILLAUD, F., et al. Recent advances and remaining challenges in thin-film silicon photovoltaic technology. *Materials Today*, 2015, vol. 18, no 7, p. 378-384.

[133] ZHANG, H. X.; HONG, R. J. CIGS absorbing layers prepared by RF magnetron sputtering from a single quaternary target. *Ceramics International*, 2016, vol. 42, no 13, p1-3.

[134] SWARTZLANDER, A., et al. PHASES, MORPHOLOGY, AND DIFFUSION IN $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{S}_2$ THIN FILMS. *Journal of applied physics*, 1997, vol. 82, no 6, p12.

[135] GREEN, Martin A., et al. Solar cell efficiency tables (Version 49). *Progress in photovoltaics: research and applications*, 2017, vol. 25, no 1, p. 3-13.

[136] GAIBAO, Seña, et al. Caracterización eléctrica y estudio de las propiedades de transporte del compuesto $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ para ser usado como capa absorbente en celdas solares. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia.

[137] MORALES, Mikel Fernando Hurtado. Estado actual de las celdas solares basadas en capas absorbentes de bajo costo $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, perspectivas y nuevos aportes realizados. *Elementos*, 2013, vol. 2, no 2.

[138] QUIROZ, Heiddy P.; CALDERÓN, Jorge A.; DUSSAN, A. Estructura cristalina del compuesto $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ depositado por co-evaporación: análisis comparativo estannita-kesterita. *Universitas Scientiarum*, 2014, vol. 19, no 2, p.115.

[139] WANG, Wei, et al. Device characteristics of CZTSSe thin-film solar cells with 12.6% efficiency. *Advanced Energy Materials*, 2014, vol. 4, no 7.

[140] GREEN, Martin A., et al. *Third generation photovoltaics*. New York: Springer, 2006.

- [141] BORELAND, Matt; BAGNALL, Darren. Current and future photovoltaics. Report for the Office of Science and Innovation (now the Department for Innovation, Universities and Skills), UK, 2006.
- [142] Krebs, F. C., Hösel, M., Corazza, M., Roth, B., Madsen, M. V., Gevorgyan, S. A., ... & Jørgensen, M. (2013). Freely available OPV—the fast way to progress. *Energy Technology*, 1(7), 378-381.
- [143] ITO, Seigo, et al. High-Efficiency Organic-Dye-Sensitized Solar Cells Controlled by Nanocrystalline-TiO₂ Electrode Thickness. *Advanced Materials*, 2006, vol. 18, no 9, p. 1202-1205.
- [144] MISHRA, Amaresh; FISCHER, Markus KR; BÄUERLE, Peter. Metal-free organic dyes for dye-sensitized solar cells: From structure: Property relationships to design rules. *Angewandte Chemie International Edition*, 2009, vol. 48, no 14, p. 2474-2499.
- [145] MILES, R. W.; HYNES, K. M.; FORBES, I. Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 2005, vol. 51, no 1, p. 1-42.
- [146] CHAMBERLAIN, G. A. Organic solar cells: A review. *Solar cells*, 1983, vol. 8, no 1, p. 47-83.
- [147] BARBOSA GARCÍA, Oracio, et al. Celdas solares orgánicas como fuente de energía sustentable. *Acta Universitaria*, 2012, vol. 22, no 5, p. 36-48.
- [148] AMERI, Tayebbeh, et al. Organic tandem solar cells: a review. *Energy & Environmental Science*, 2009, vol. 2, no 4, p. 347-363.
- [149] E. Nava, Caracterización Puntual de Celdas Solares Orgánicas por LBIC. Tesis de maestría, Centro de Investigaciones en Óptica (2014) México.
- [150] HABAS, Susan E., et al. Low-cost inorganic solar cells: from ink to printed device. *Chemical reviews*, 2010, vol. 110, no 11, p. 6571-6594.
- [151] LEE, Michael M., et al. Efficient hybrid solar cells based on meso-structured organometal halide perovskites. *Science*, 2012, vol. 338, no 6107, p. 1-6.
- [152] El 99% CH (NH₂)₂PbI₃ (FAPbI₃).Página consultada en la web, Diciembre 2016. <http://spanish.oledborun.com/sell-1833725-99-ch-nh2-2pbi3-fapbi3.html#.WlpSMfB97IV>

[153] YANG, Woon Seok, et al. High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange. *Science*, 2015, vol. 348, no 6240, p. 1-5

[154] MONTOYA, Diana Marcela. Películas Orgánico-Inorgánicas con Estructura Perovskita como Capa Activa en Dispositivos Fotovoltaicos. 2016.p.22-35.

[155] JUNG, Hyun Suk; PARK, Nam-Gyu. Perovskite solar cells: from materials to devices. *small*, 2015, vol. 11, no 1, p. 10-25.

[156] BEST RESEARCH-CELL EFFICIENCIES NREL. *Página consultada en la web* Enero 2017. <http://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>

BIBLIOGRAFÍA

L. a. S. Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons, Ltd, 2003.

ABERLE, Armin G. Surface passivation of crystalline silicon solar cells: a review. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2000, vol. 8, no 5, p. 473-487

ABERMANN, Stephan. Non-vacuum processed next generation thin film photovoltaics: towards marketable efficiency and production of CZTS based solar cells. Solar Energy, 2013, vol. 94, p. 37-70.

ABOU-RAS, Daniel; KIRCHARTZ, Thomas; RAU, Uwe (ed.). *Advanced characterization techniques for thin film solar cells*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2011.

ALCÁNTARA, Salvador Ponce. Células solares de silicio: Fundamentos y Aplicaciones. Malaga, España, 2008.

AMERI, Tayebbeh, et al. Organic tandem solar cells: a review. Energy & Environmental Science, 2009, vol. 2, no 4, p. 347-363

APS NEWS APRIL 25, 1954 Bell Labs Demonstrates the First Practical Silicon Solar Cell. Página consultada en la web Septiembre 2016. <http://www.aps.org/publications/apsnews/200904/physicshistory.cfm>

ARCHER, Mary D.; GREEN, Martin A. (ed.). Clean electricity from photovoltaics. World Scientific, 2014.p.349-355.

BALASUBRAMANIAN, AMA Banupriya; ARIFFIN, A. M. Current State-of-the-Art Solar Photovoltaic (PV) Technologies. Australian Journal of Basic and

Applied Sciences, 2014, vol. 8, no 6, p. 1-8.

BARBOSA GARCÍA, Oracio, et al. Celdas solares orgánicas como fuente de energía sustentable. Acta Universitaria, 2012, vol. 22, no 5, p. 36-48.

BARRERA, Manuel Fernández. Energía solar: Electricidad fotovoltaica. Editorial Liber Factory, 2010.

BARRERA, Marcela P. Simulación y caracterización de celdas solares multijuntura y de silicio cristalino para aplicaciones espaciales. 2009. Tesis Doctoral. Tesis de doctorado, Universidad Nacional de General San Martín, Argentina.

BDH. Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie. Página consultada en la web el septiembre 2016 <http://www.bdh-koeln.de/presse/pressemitteilungen/artikel///dynamisches-wachstum-in-2015-deutsche-heizungsindustrie-zieht-jahresbilanz.html>

BELTRÁN GÓMEZ, Lady Viviana, et al. Análisis de los diferentes tipos de energías alternativas y su implementación en Colombia. 2016. Tesis de Licenciatura. Universidad Militar Nueva Granada.

BENITEZ, P., et al. Ultra-High Efficiency, High-Concentration PV System Based On Spectral Division Between GaInP/GaInAs/Ge And BPC Silicon Cells. En DIMROTH, Frank (ed.). AIP Conference Proceedings. AIP, 2011. p. 1-4.

BEST RESEARCH-CELL EFFICIENCIES NREL. Página consultada en la web Enero 2017. <http://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>

BOGADO, MG Martínez. Diseño, elaboración, caracterización y ensayos de dispositivos fotovoltaicos para usos espaciales. 2004. Tesis Doctoral. Tesis de doctorado, Universidad Nacional de General San Martín, Argentina

BORELAND, Matt; BAGNALL, Darren. Current and future photovoltaics. Report for the Office of Science and Innovation (now the Department for Innovation, Universities and Skills), UK, 2006.

Botero Londoño Mónica Andrea, Tesis de Doctorado, Síntesis y Caracterización de Nuevos Materiales no Tóxicos empleados Como capa Buffer y Capa Absorbente en la fabricación de Celdas Solares, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Física, 2008.

BRABEC, Christoph J., et al. Polymer–fullerene bulk-heterojunction solar cells. *Advanced Materials*, 2010, vol. 22, no 34, p. 3839-3856.

BRODSKY, Marc H. Avances en semiconductores de arseniuro de galio. *Investigación y ciencia*, 1990, no 163, p. 58-67

Bube, R. H., & Bube, R. H... *Photovoltaic materials* (Vol. 1). Amsterdam: Imperial College Press. 1998

CANDAL, R.; BILMES, Sara A.; BLESA, Miguel A. Semiconductores con actividad fotocatalítica. en Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea. M. Blesa, Ed. La Plata (Argentina): CYTED, 2001, p. 79-10

CÉSPEDES, Jorge Enrique Salamanca. CELDAS FOTOVOLTAICAS DE ALTA EFICIENCIA Y SISTEMA DE PANELES SOLARES DEL CUBESAT COLOMBIA 1. *Redes de Ingeniería*, 2013, vol. 3, no 2, p. 41-50.

CHAMBERLAIN, G. A. Organic solar cells: A review. *Solar cells*, 1983, vol. 8, no 1, p. 47-83.

CHAPIN, Daryl M.; FULLER, C. S.; PEARSON, G. L. A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. *Journal of Applied Physics*, 1954, vol. 25, no 5, p. 676-677.

CHO, Jinyoun, et al. 21%-Efficient n-type Rear-junction PERT Solar Cell with Industrial Thin 156mm Cz Single Crystalline Silicon Wafer. *Energy Procedia*, 2015, vol. 77, p. 279-285.

Conference: World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, At Waikaloa, HI, Volume: 1. 24% EFFICIENT SILICON SOLAR CELLS. Consultada en la web noviembre 2016. https://www.researchgate.net/publication/3657453_24_Efficient_silicon_solar_cells

DE LOS SEMICONDUCTORES, ESTRUCTURA DE BANDAS. FUNDAMENTOS FISICOS DE LAS CELDAS SOLARES. Página consultada en la web el, Noviembre 2016: http://paginas.fisica.uson.mx/horacio.munguia/aula_virtual/Cursos/Electronica/Documentos/Celdas_Solares1.pdf

DE VECCHI, S., et al. Point contacts technology for silicon heterojunction solar cells. *Energy Procedia*, 2012, vol. 27, p. 549-554.

DE WOLF, Stefaan, et al. High-efficiency silicon heterojunction solar cells: a review. *Green*, 2012, vol. 2, no 1, p. 1-18

DEMAUREX, Bénédicte. Passivating contacts for homojunction solar cells using a-Si: H/c-Si hetero-interfaces. 2014. Tesis Doctoral. ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE.

DIMROTH, Frank, et al. Four-junction wafer-bonded concentrator solar cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2016, vol. 6, no 1, p. 343-349.

DIMROTH, Frank; KURTZ, Sarah. High-efficiency multijunction solar cells. *MRS bulletin*, 2007, vol. 32, no 03, p. 230-235.

DUBÉ, MC Inti Zumeta. Estudio de capas nanoestructuradas de TiO₂ para celdas fotoelectroquímicas.

E. Nava, Caracterización Puntual de Celdas Solares Orgánicas por LBIC. Tesis de maestría, Centro de Investigaciones en Óptica (2014) México

EFFECTO HALL. Consultada en la web noviembre 2016.
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/Hall.html>.

El 99% CH (NH₂) PbI₃ (FAPbI₃).Página consultada en la web, Diciembre 2016.
<http://spanish.oledborun.com/sell-1833725-99-ch-nh2-2pbi3-fapbi3.html#.WlpSMfB97IV>

Escenarios y Estrategias, Minería Energía, Unidad de Planeación Minero Energética, No.9, Bogotá Marzo de 2006. p (22).

FILLALI, Laila. Síntesis y caracterización microestructural de alúminas obtenidas a partir de un precursor no convencional. 2015. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.

First Solar Press Release. First solar builds the highest efficiency thin film PV cell on record, 5 August 2014. Página web consultada en Diciembre 2016.
http://files.shareholder.com/downloads/FSLR/0x0x773989/5f8cc8fe-7d05-4c4d-b8e8-78206cede53d/FSLR_News_2014_8_5_English.pdf

FISICA DE LA UNION p-n. Tema 3: Física de la unión p-n. Página consultada en la web noviembre 2016 [http://www.uv.es/candid/docencia/Tema3\(01-02\).pdf](http://www.uv.es/candid/docencia/Tema3(01-02).pdf).

FONASH, Stephen. Solar cell device physics. Elsevier, 2012.

FRAAS, Lewis M.; ZANIO, Kenneth R.; KNECHTLI, Ronald C. Multijunction gallium aluminum arsenide-gallium arsenide-germanium solar cell and process

for fabricating same. U.S. Patent No 4, 128,733, 5 Dic. 1978

GAIBAO, Seña, et al. Caracterización eléctrica y estudio de las propiedades de transporte del compuesto $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ para ser usado como capa absorbente en celdas solares. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia.

GARCÉS PINEDA, Felipe Andrés. Estudio de las estructuras silicio poroso/óxidos conductores transparentes. 2013. Tesis Doctoral.

GARCÉS, Pablo. Energía Sostenible–Perspectiva Regional: Centroamérica–América Latina y El Caribe. Seminario Regional de Capacitación para América Central (SICA-OLADE), Costa Rica, 2013.

GORDILLO, Gerardo. Conversión fotovoltaica de la energía solar. Rev. Acad. Colomb. Cienc, 1998, vol. 22, no 83, p. 203-211.

GRÄTZEL, Michael. Photoelectrochemical cells. Nature, 2001, vol. 414, no 6861, p. 338-344.

Green, M. A. (2009). The path to 25% silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 17(3), 183-189

GREEN, Martin A., et al. Solar cell efficiency tables (Version 49).Progress in photovoltaics: research and applications, 2017, vol. 25, no 1, p. 3-13.

GREEN, Martin A., et al. Third generation photovoltaics. New York: Springer, 2006.

GREENPEACE, Solar SPACES. ESTELA. 2009. *Energía Solar Térmica de Concentración*, 2009.

GUREVICH, Yuri; LIRA, G. Miguel Meléndez. Fenómenos de contacto y sus aplicaciones en celdas solares. Fondo de Cultura Económica, 2013. pp104-121

HABAS, Susan E., et al. Low-cost inorganic solar cells: from ink to printed device. *Chemical reviews*, 2010, vol. 110, no 11, p. 6571-6594.

HAHN, Giso; SCHÖNECKER, Axel. New crystalline silicon ribbon materials for photovoltaics. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2004, vol. 16, no 50, p. R1615.

HIRSHMAN, William P.; HERING, Garret; SCHMELA, Michael. Cell and module production 2007. *Photon International*, 2008, vol. 152

HLAWICZKA, Paul. Introducción a la electrónica cuántica. Reverté, 1977

HUMBERTO RODRÍGUEZ MURCIA, Desarrollo de la Energía Solar en Colombia y sus Perspectivas, 2009.

HWANG, H. L., et al. Application of luminescence in studies of photovoltaic properties of Cu-Cd-S solar cells. *Journal of Crystal Growth*, 1982, vol. 59, no 1-2, p. 425-431.

Integración De Las Energías Renovables No Convencionales En Colombia, UPME, ISBN No. 978-958-8363-26-4. Bogotá 2015. p (40-41)

INTHISANG, Sorapong, et al. Hydrogenated amorphous silicon oxide solar cells fabricated near the phase transition between amorphous and microcrystalline structures. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2009, vol. 48, no 12R.

ITO, Seigo, et al. High-Efficiency Organic-Dye-Sensitized Solar Cells Controlled by Nanocrystalline-TiO₂ Electrode Thickness. *Advanced Materials*, 2006, vol. 18, no 9, p. 1202-1205.

Jooß, W. Capítulo 1. *Multicrystalline and back contact buried contact silicon solar cells* (Doctoral dissertation). (2002).

JORDAN, D.; NAGLE, J. P. Buried contact concentrator solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 1994, vol. 2, p. 171-176.

JUNG, Hyun Suk; PARK, Nam-Gyu. Perovskite solar cells: from materials to devices. *small*, 2015, vol. 11, no 1, p. 10-25.

KERSCHAUER, Emmanuel Van; BEAUCARNE, Guy. Back-contact solar cells: A review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2006, vol. 14, no 2, p. 107-123.

KERSCHAUER, Emmanuel Van; BEAUCARNE, Guy. Back-contact solar cells: A review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2006, vol. 14, no 2, p. 107-123.

KIM, Dong Seop, et al. String ribbon silicon solar cells with 17.8% efficiency. *En Photovoltaic Energy Conversion*, 2003. *Proceedings of 3rd World Conference on. IEEE*, 2003. p. 1293-1296.

KITAI, *Principles of Solar Cells, LEDs and Diodes*, John Wiley & Sons, Ltd, 2011.

KODIGALA, Subba Ramaiah. *Cu (In_{1-x}Ga_x) Se₂ Based thin film solar cells*. Academic Press, 2011.p.p (10-12).

Krebs, F. C., Hösel, M., Corazza, M., Roth, B., Madsen, M. V., Gevorgyan, S. A., ... & Jørgensen, M. (2013). Freely available OPV—the fast way to progress. *Energy Technology*, 1(7), 378-381.

LEE, Michael M., et al. Efficient hybrid solar cells based on meso-

superstructured organometal halide perovskites. *Science*, 2012, vol. 338, no 6107, p. 1-6.

LEVY, Michael Y. Maturity of Photovoltaic Solar-Energy Conversion. INTECH Open Access Publisher, 2011.p.10-12.

Ley 1715 Del 2014, "Por Medio de La cual se Regula La Integración De Las Energías Renovables No Convencionales Al Sistema Energético Nacional". Disponible en Línea: http://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf

LICHT, Stuart. Photoelectrochemical solar energy storage cells. *Encyclopedia of Electrochemistry*, 2002.

LIU, Mingzhen; JOHNSTON, Michael B.; SNAITH, Henry J. Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition. *Nature*, 2013, vol. 501, no 7467, p. 395-398.

LÓPEZ, Fernando Villar. Dispositivos fotovoltaicos de capa delgada a baja temperatura. Universitat de Barcelona, 2010.

LÓPEZ, J. A. Desarrollo de una tecnología de dopado tipo n en telururo de cadmio y mercurio mediante técnicas de implantación iónica y recocidos térmicos rápidos. 1995. Tesis Doctoral. Tesis Doctoral. Departamento de Tecnología Electrónica, UPM.

LUTHER, Joseph M., et al. Schottky solar cells based on colloidal nanocrystal films. *Nano letters*, 2008, vol. 8, no 10, p. 12.

MADRIZ, Lorean, et al. Celdas solares fotoelectroquímicas basadas en Bi₂WO₆. *Quim. Nova*, 2014, vol. 37, no 2, p. 226-231.

MASUKO, Keiichiro, et al. Achievement of more than 25% conversion efficiency with crystalline silicon heterojunction solar cell. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2014, vol. 4, no 6, p. 1433-1435.

MASUKO, Keiichiro, et al. Achievement of more than 25% conversion efficiency with crystalline silicon heterojunction solar cell. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2014, vol. 4, no 6, p. 1433-1435.

MATSUMOTO, Yasuhiro; DEL ESTADO SÓLIDO, Sección de Electrónica. Celdas Solares de Silicio: Fundamento y Tendencia. Div. Ciencias e Ing. Univ. Quintana Roo, 2011, p. 44.

MEDINA DE PRÓCEL, Margarita. Estudio de sistemas fotovoltaicos como fuente renovable de energía. 1994. Tesis Doctoral. Quito: EPN, 1994

MEIER, J., et al. Complete microcrystalline p-i-n solar cell—Crystalline or amorphous cell behavior. *Applied Physics Letters*, 1994, vol. 65, no 7, p. 860-862.

MEILLAUD, F., et al. Recent advances and remaining challenges in thin-film silicon photovoltaic technology. *Materials Today*, 2015, vol. 18, no 7, p. 378-384.

MILES, R. W.; HYNES, K. M.; FORBES, I. Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 2005, vol. 51, no 1, p. 1-42.

MISHIMA, Takahiro, et al. Development status of high-efficiency HIT solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, vol. 95, no 1, p. 18-21.

MISHRA, Amaresh; FISCHER, Markus KR; BÄUERLE, Peter. Metal-free organic dyes for dye-sensitized solar cells: From structure: Property relationships to design rules. *Angewandte Chemie International Edition*, 2009, vol. 48, no 14, p. 2474-2499.

MONTESES, Julio Joffre Barzola. Eficiencia de una celda solar común y su comparación con celdas de tecnología HIT. *Revista Tecnológica-ESPOL*, 2013, vol. 26, no 2

MONTOYA, Diana Marcela. Películas Orgánico-Inorgánicas con Estructura Perovskita como Capa Activa en Dispositivos Fotovoltaicos. 2016.p.22-35.

MORALES, Mikel Fernando Hurtado. Estado actual de las celdas solares basadas en capas absorbentes de bajo costo Cu_2ZnSnS_4 , perspectivas y nuevos aportes realizados. *Elementos*, 2013, vol. 2, no 2.

MORENO, Mario, et al. DEVELOPMENT OF A FABRICATION PROCESS OF C-SI SOLAR CELLS TOWARDS A OWN TECHNOLOGY OF HIGH EFFICIENCY AND LARGE AREA.

NIVEL DE FERMI. Consultada en la web noviembre 2016. <https://es.scribd.com/doc/151429966/La-Energia-de-Fermi-en-Los-Semiconductores-Intrinsecos>

OVIEDO-SALAZAR, J. L., et al. Historia y Uso de Energías Renovables History and Use of Renewable Energies. *Daena: International Journal of Good Conscience*, 2015, vol. 10, no 1, p. 1-18.

PANASONIC CORPORATION. Página consultada en la web el, octubre 2016: <https://eu-solar.panasonic.net/en/panasonic-hit-sanyo-history.htm>

Panasonic HIT® Solar Cell Achieves World's Highest Energy Conversion

Efficiency of 25.6%*2 at Research Level. Disponible en: <http://news.panasonic.com/global/press/data/2014/04/en140410-4/en140410-4.html>

PAUL, William; ANDERSON, David A. Properties of amorphous hydrogenated silicon, with special emphasis on preparation by sputtering. *Solar Energy Materials*, 1981, vol. 5, no 3, p. 229-316.

PAVEL, Akeed Ahmed; KHAN, M. Rezwan. Enhancing efficiency of a heteroface solar cell. En *Electron Devices, 2005 Spanish Conference on*. IEEE, 2005. p. 263-266.

PILIEGO, Claudia, et al. 5.2% efficient PbS nanocrystal Schottky solar cells. *Energy & Environmental Science*, 2013, vol. 6, no 10, p. 2-23.

PLÁ, J.; DURÁN, Julio César; SOLAR, Grupo Energía. Tratamientos superficiales antirreflectantes y elaboración de juntas para celdas solares de silicio cristalino. 1998. Tesis Doctoral. Tesis Doctoral

PRAT VIÑAS, Lluís; CALDERER CARDONA, Josep. Dispositivos electrónicos y fotónicos: fundamentos. 2003.

QUIROZ, Heiddy P.; CALDERÓN, Jorge A.; DUSSAN, A. Estructura cristalina del compuesto $Cu_2ZnSnSe_4$ depositado por co-evaporación: análisis comparativo estannita-kesterita. *Universitas Scientiarum*, 2014, vol. 19, no 2, p.115.

RAMÍREZ, Jaime. Inteligencia tecnológica como herramienta para la diversificación y sofisticación productiva: el caso del grafeno. 2015

RASERO, Carlos Montoya. Energía solar fotovoltaica. 2000

Renewables Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat). ISBN 978-3-9818107-0-7. Disponible En Línea: [Http: www.Ren21.Net /WpContent/Uploads/ 2016/ 06 / GSR_2016_Full_Report_REN21.Pdf](http://www.Ren21.Net/WpContent/Uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report_REN21.Pdf), p (62) Consulta: Julio 27 Del 2016

RINALDI, Pablo Andrés. Propiedades ópticas y estructurales del silicio amorfo hidrogenado con diversos grados de cristalinidad. 2012. Tesis Doctoral

S.R.Wenham.M.A.Green,"Buried contact solar cell",US Patent US 4,726,85, 1988.

SARLEMIJN, A.; KROES, P. Innovation and basic research in the industrial laboratory: the repeater, transistor and Bell Telephone System. Between Science and Technology, 2012, p. 181

SASAKI, Kazuaki, et al. Development of InGaP/GaAs/InGaAs inverted triple junction concentrator solar cells. En DIMROTH, Frank; ARAKI, Kenji; ANTÓN, Ignacio (ed.). AIP Conference Proceedings. AIP, 2013. p. 22-25.

SE4ALL. Sustainable energy for all. Página consultada en la web Septiembre 2016. <http://www.se4all.org/>

SHACKELFORD, James F., et al. Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros. Pearson:, 2010.

SHARMA, Shruti; JAIN, Kamlesh Kumar; SHARMA, Ashutosh. Solar cells: in research and applications—a review. Materials Sciences and Applications, 2015, vol. 6, no 12, p. 1145-1155.

SHOCKLEY, William; QUEISSER, Hans J. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. Journal of applied physics, 1961, vol. 32, no 3, p. 510-519.

SMITH, Willoughby. The action of light on selenium. Journal of the Society of Telegraph Engineers, 1873, vol. 2, no 4, p. 31-33.

SOSA, José Antonio Gordillo, et al. Ciencias de la Ingeniería y Tecnología Handbook T-IV: Congreso Interdisciplinario de Cuerpos Académicos. 2014.

SPRINGER, J., et al. Light trapping and optical losses in microcrystalline silicon pin solar cells deposited on surface-textured glass/ZnO substrates. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2005, vol. 85, no 1, p. 1-11.

STREICHER, Morgana. Crescimento e caracterização de cristais de GaSb e GaInSB obtidos através do método Czochralski com líquido encapsulante. 2011. Tesis de Maestría. Pontificia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

Subba Ramaiah Kodigala, Thin Films and Nanostructures Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂ Based Thin Film Solar Cells, Department of Physics & Astronomy California State University, Volume 35, pp (10) 2010.

SWANSON, Richard M., et al. Point-contact silicon solar cells. IEEE Transactions on Electron Devices, 1984, vol. 31, no 5, p. 661-664.

SWARTZLANDER, A., et al. PHASES, MORPHOLOGY, AND DIFFUSION IN CULNXGA1-XSE2 THIN FILMS. Journal of applied physics, 1997, vol. 82, no 6, p12

TANG, Jiang, et al. Schottky quantum dot solar cells stable in air under solar illumination. Advanced materials, 2010, vol. 22, no 12, p. 1398-1402.

TIPLER, Paul A.; LLEWELLYN, Ralph. Modern physics. Macmillan, 2003

TIWARI, Gopal Nath; DUBEY, Swapnil. Fundamentals of photovoltaic modules

and their applications. Royal Society of Chemistry, 2010.p.112-114.

TOHODA, Satoshi, et al. Future directions for higher-efficiency HIT solar cells using a Thin Silicon Wafer. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2012, vol. 358, no 17, p. 2219-2222.

TOMASZEWSKI, Paweł E. Jan Czochralski—father of the Czochralski method. *Journal of crystal growth*, 2002, vol. 236, no 1, p. 1-4.

TORCHYNSKA, T. V.; POLUPAN, G. High efficiency solar cells for space applications. *Superficies Vacio*, 2004, vol. 17, no 3, p. 21-25.

UNITED STATES PATENT OFFICE , Light Sensitive Electric Device , Russell S. OHL, Little Silver,N.J., assignor to Bell Telephone Laboratories, Incorporated, New York, N.Y; a corporation od New York, Serial No. 395,410, June 25 of 1.946.

UPME, IDEAM. Atlas de Radiación solar de Colombia. Santafé de Bogotá DC: Unidad de Planeación Minero Energética, Ministerio de Minas y Energía, 2005

URBANO, Janett Barbosa, et al. Estudio para el uso de la tecnología solar fotovoltaica. *Ingeniería solidaria*, 2011, vol. 6, no 10-11, p. 69-81.

VILAMITJANA, David Soler; SERRA, Enric Bertrán. Amorphous silicon solar cells obtained by Hot-Wire Chemical Vapour Deposition. *Universitat de Barcelona*, 2004.

W.Fuchs, K. Niemann and J. Stuke, *AIP Conf. Proc.* 20, 345 (1974).

WALDER, Cordula, et al. Amorphous silicon oxinitride in silicon thin-film solar cells. *Energy Procedia*, 2014, vol. 44, p. 1-6

WANG, Wei, et al. Device characteristics of CZTSSe thin-film solar cells with 12.6% efficiency. *Advanced Energy Materials*, 2014, vol. 4, no 7.

WOHLGEMUTH, J. H.; NARAYANAN, S. Buried contact concentrator solar cells. En *Photovoltaic Specialists Conference, 1991.*, Conference Record of the Twenty Second IEEE. IEEE, 1991. p. 273-277

WOJTCZUK, Steven J., et al. Method of fabricating bifacial tandem solar cells. U.S. Patent No 8,852,994, 7 Oct. 2014.

WORLD'S HIGHEST CONVERSION EFFICIENCY OF 26.33% ACHIEVED IN A CRYSTALLINE SILICON SOLAR CELL. Página consultada en la web diciembre 2016: http://www.kaneka.co.jp/kaneka-e/images/topics/1473811995/1473811995_101.pdf

Würfel, P., & Würfel, U. (2009). Pp (131). *Physics of solar cells: from basic principles to advanced concepts*. John Wiley & Sons.

YANG, Woon Seok, et al. High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange. *Science*, 2015, vol. 348, no 6240, p. 1-5

YU, Gang, et al. Polymer photovoltaic cells: Enhanced efficiencies via a network of internal donor-acceptor heterojunctions. *Science*, 1995, vol. 270, no 5243, p. 1789.

ZARZA MOYA, Eduardo, et al. Generación directa de vapor con colectores solares cilindro parabólicos Proyecto Direct Solar Steam (DISS). 2003.

ZHANG, H. X.; HONG, R. J. CIGS absorbing layers prepared by RF magnetron sputtering from a single quaternary target. *Ceramics International*, 2016, vol. 42, no 13, p1-3.

ZHANG, Shu, et al. 335-W world-record p-type monocrystalline module with 20.6% efficient PERC solar cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2016, vol. 6, no 1, p. 145-152.

ZHAO, J. Passivated emitter rear locally diffused solar cells. *Bulletin of advanced technology research*, 2011, vol. 5, no 8.

ZHAO, Jianhua; WANG, Aihua. Rear emitter n-type passivated emitter, rear totally diffused silicon solar cell structure. *Applied physics letters*, 2006, vol. 88, no 24, p. 242102.

ZHAO, Jianhua; WANG, Aihua; GREEN, Martin A. High-efficiency PERL and PERT silicon solar cells on FZ and MCZ substrates. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2001, vol. 65, no 1, p. 429-435.

Zolper, J. C., Narayanan, S., Wenham, S. R., & Green, M. A. (1989). 16.7% efficient, laser textured, buried contact polycrystalline silicon solar cell. *Applied Physics Letters*, 55(22), 2363-2365

Zweibel, K., & Hersch, P. *Basic photovoltaic principles and methods*. Van Nostrand Reinhold Company 1982.