

Análisis comparativo de las principales tecnologías de la Energía Solar Fotovoltaica:
Alcance comercial, aplicaciones y retos

Angie Ximena Males Ramos

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente - ECAPMA

Bogotá D.C., Colombia.

Ingeniería Ambiental

2021

Análisis comparativo de las principales tecnologías de la Energía Solar Fotovoltaica:
Alcance comercial, aplicaciones y retos

Monografía o trabajo de investigación como requisito parcial para optar por el título de:

Ingeniero Ambiental

Angie Ximena Males Ramos

Director:

MSc. Luis Alejandro Duarte Rodríguez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente - ECAPMA

Bogotá D.C., Colombia.

Ingeniería Ambiental

2021

Dedicatoria

A esas mujeres que siempre confiaron en mí y supieron lo que era capaz, mucho antes que yo me diera cuenta.

Agradecimientos

A todos aquellos que me acompañaron y me dieron las herramientas precisas para buscar el enfoque necesario para elaborar este documento.

Resumen

Este documento incluye una revisión del estado actual de la tecnología solar fotovoltaica, reconociendo las tecnologías que mayor éxito tecnológico y comercial tienen en el mundo y una recopilación que incluye las características de cada una de estas. Los primeros cuatro capítulos corresponden a un acercamiento de las celdas que mayor participación tienen en el mercado energético incluyendo las características del material semiconductor, el electrodo presente en su estructura, arquitectura general de cada celda, su funcionamiento y su nivel de eficiencia; el primer capítulo hace referencia a las celdas de Silicio cristalino siendo la tecnología que mayor desarrollo y difusión presentan en el mercado energético mundial; el segundo capítulo abarca las celdas fotovoltaicas con tecnologías de películas delgadas como las celdas de Silicio amorfo, Cadmio Telurio (CdTe) y Sulfuro de Estaño (SnS); El tercer capítulo hace referencia a las celdas con tecnologías que se encuentran en proceso de desarrollo como, son las celdas orgánicas, a base de tintes o Perovskitas.

En los capítulos finales se analizará la difusión de esta tecnología en el mundo, en el país y los casos de éxito que se han presentado, finalmente se hará un recorrido sobre la normativa energética nacional la cual se encuentra bajo el marco de la producción energética a base de Fuentes No Convencionales de Energía Renovables FNCER buscando identificar las políticas que incentivan el desarrollo de la generación de energía con tecnologías solares fotovoltaicas.

Palabras clave: Energía solar, Celdas fotovoltaicas, Rendimiento de celdas, Mercado energético.

Abstract

This document includes a review of the current state of solar photovoltaic technology, recognizing the most technologically and commercially successful technologies in the world and a compilation that includes the characteristics of each of these. The first four chapters correspond to an approach of the cells that have greater participation in the energy market including the characteristics of the semiconductor material, the electrode present in its structure, general architecture of each cell, its operation and its level of efficiency; the first chapter refers to crystalline silicon cells being the most developed and widespread technology in the world energy market; The second chapter covers photovoltaic cells with thin film technologies such as amorphous silicon, Cadmium Telluride (CdTe) and Tin Sulfide (SnS) cells. The third chapter refers to cells with technologies that are in the process of development, such as organic cells, dye-based or Perovskite cells.

The final chapters will analyze the diffusion of this technology in the world, in the country and the success cases that have been presented. Finally, there will be a review of the national energy regulations which are under the framework of energy production based on non-conventional renewable energy sources FNCER, seeking to identify the policies that encourage the development of energy generation with solar photovoltaic technologies.

Key words: Solar energy, Photovoltaic cells, Cell performance, Energy market.

Tabla de contenido

| | |
|---|----|
| Resumen | 2 |
| Abstract | 1 |
| Lista de símbolos y Abreviaturas | 4 |
| Lista de Figuras | 7 |
| Lista de tablas | 7 |
| Lista de Ecuaciones | 8 |
| Planteamiento del problema | 9 |
| Justificación | 12 |
| Objetivos | 15 |
| Introducción | 16 |
| Capítulo 1. Tecnología del Silicio Cristalino. | 20 |
| Producción de celdas a partir de Silicio. | 20 |
| Obtención y purificación del Silicio | 20 |
| Fabricación de las obleas | 23 |
| Texturización | 23 |
| Formación de la Unión PN | 24 |
| Iluminación de la unión PN | 26 |
| Formación de contactos | 26 |
| Propiedades y caracterización de las celdas solares a base de silicio cristalino. | 27 |
| Eficiencia de las celdas de silicio | 29 |
| Esquemas de las celdas solares de silicio | 31 |
| Diseños avanzados para mejorar las celdas de Silicio tipo Wafer | 31 |
| Capítulo 2. Tecnología de película delgada | 33 |
| Células de película delgada de Silicio Amorfo (a-Si) | 33 |
| Modelo eléctrico de las celdas de Silicio amorfo (a-Si) | 34 |
| La unión pin o nip | 35 |
| Rendimiento células de silicio amorfo | 37 |
| Celdas fotovoltaicas materiales III-V | 38 |
| Propiedades de los materiales III-V | 38 |
| Células de película delgada a base de Cadmio Telurio (CdTe). | 39 |
| Estructura de la celda a base CdTe | 40 |
| Rendimiento de las celdas a base de CdTe | 42 |

| | |
|---|----|
| Células solares basadas en Calcopirritas | 43 |
| Estructuras de las celdas a base de Cu(In, Ga)Se ₂ | 43 |
| Células de película delgada a base de sulfuro de estaño (SnS) | 46 |
| Propiedades de las celdas SnS | 46 |
| Esquema de las celdas. | 47 |
| Métodos de deposición de las películas delgadas | 48 |
| Deposición de baño químico (CBD) | 48 |
| Depósito químico en fase vapor asistido por plasma PECVD (Plasma enhancing chemical vapour depositing). | 48 |
| Deposito HW CVD (Hide wire chemical vapour depositing) o CVD-Catalítico | 49 |
| Depósito Epitaxial | 49 |
| Capítulo 3. Tecnologías a base de materiales orgánicos | 50 |
| Celdas solares orgánicas CSO (Polimeros). | 50 |
| Semiconductores orgánicos | 50 |
| Estructura de las celdas solares orgánicas | 53 |
| Electrodos de las celdas orgánicas | 53 |
| Celdas sensibilizadas con tintes. | 54 |
| Celdas solares de Perovskita | 56 |
| Arquitectura de las celdas Perovskita | 57 |
| Desarrollo de las celdas de Perovskitas | 58 |
| Capítulo 4. Demanda de energía eléctrica. | 60 |
| Capítulo 5. El estado de las tecnologías fotovoltaicas en el mundo. | 63 |
| El estado de las tecnologías fotovoltaicas en Colombia. | 67 |
| Marco normativo de aplicación para la energía fotovoltaica en el país. | 75 |
| Viabilidad de la energía fotovoltaica en el país. | 78 |
| Conclusiones | 80 |
| Anexo 1. Conversión de unidades KTOE a TWh del consumo eléctrico mundial por sector. | 84 |
| Bibliografía | 85 |

Lista de símbolos y Abreviaturas

| | |
|------------|--------------------------------------|
| Al | Aluminio |
| Ag | Plata |
| AM1.5 | Air mass 1.5 |
| aSi | Silicio amorfo |
| aSi:H | Silicio amorfo Hidrogenado |
| As | Arsénico |
| AsGa | Arseniuro de Galio |
| Au | Oro |
| B | Boro |
| B_2H_6 | Diborano |
| BHJ | Heterounión gruesa |
| BIPV | Building integrated photovoltaic |
| BECO | Balance energético colombiano |
| Cd | Cadmio |
| CDP | Chemical Bath deposition |
| CdTe | Cadmio Telurio |
| CREG | Comisión reguladora de energía y gas |
| cSi | Silicio Cristalino |
| $CsPbBr_3$ | Perovskitas |
| DS | Solidificación Direccional |
| EQ | Eficiencia Cuántica |
| ESL | Capa selectiva de electrones |
| e^- | Electrones |
| FTO | Oxido de Estaño dopado con Fluorina. |
| Ga | Galio |
| Ge | Germanio |
| In | Indio |
| I^- | Yoduro |

| | |
|-------------------------|---|
| I_3^- | Triyoduro |
| I_{SC} | Corriente de corto circuito |
| I_{mpp} | Corriente de potencia máxima |
| IDEAM | Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales |
| IPSE | Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para Zonas No Interconectadas |
| IRENA | Instituto de la agencia internacional de energías renovables |
| ITO | Oxido de Indio y Estaño |
| IVA | Impuesto de valor agregado |
| HCl | Ácido Clorhídrico |
| HIT | Heterojunction with intrinsic Layer |
| HSL | Capa selectiva de Huecos |
| HOMO | Highest occupied molecular orbital |
| FENOGE | Gestión eficiente de la energía |
| FF | Factor de forma |
| FNCE | Fuentes no convencionales de energía. |
| FNCER | Fuentes no convencionales de energía Renovables |
| KW | Kilovatios |
| KTOE | Kilotonelada equivalente de Petróleo |
| LUMO | Lower unoccupied molecular orbital |
| NO_3H | Ácido Nítrico |
| Nm | Nanometros |
| P | Fosforo |
| PECVD | Plasma enhanced and vapor deposition |
| <i>PEDOT*</i> | Poli (3,4-etilendioxitofeno) |
| PPA | Power Purchase Agreement |
| PRI | periodo de retorno de inversión |
| PROURE | Programa de uso racional y eficiente de la energía y demás formas de energías no convencionales |
| <i>PSS</i> ⁻ | Poli (Estirenosulfonato) |

| | |
|-----------|--|
| PH_3 | Fosfina |
| p_{mpp} | Potencia Máxima |
| Pt | Platino |
| PV | Photovoltaic |
| Sb | Antimonio |
| Se | Selenio |
| Si | Silicio |
| SiC | Carburo de Silicio |
| Si-mc | Silicio Monocristalino |
| Si-pc | Silicio policristalino |
| SiN | Nitruro de Silicio |
| Sn | Estaño |
| SnS | Sulfuro de Estaño |
| $SnO_2:F$ | Oxido de Estaño dopado con Fluorina. |
| SIGIPSE | Sistema de información geográfica del IPSE |
| STN | Sistema de transmisión nacional. |
| STR | Sistema de transmisión regional. |
| TCO | Transparent Conducting Oxide |
| Te | Telurio |
| TiO_2 | Oxido de Titanio |
| TWh | Tera vatio hora |
| μm | Micrómetros |
| UPME | Unidad nacional minero energética |
| URE | Uso racional y eficiente de la energía |
| V_{oc} | Voltaje de circuito abierto |
| V_{mpp} | Voltaje de potencia máxima |
| ZIN | Zonas no interconectadas |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Récord de eficiencias en celdas solares obtenidas por laboratorios de investigación en el mundo. | 19 |
| Figura 2. Proceso fabricación del Silicio. | 20 |
| Figura 3. Esquema y partes constituyentes de una celda de silicio. | 31 |
| Figura 4. Colas de banda a-Si:H. | 35 |
| Figura 5. Estructura celdas capa delgada a) Superestrato b) Substrato. | 36 |
| Figura 6. Estructura celda elementos grupo III y V, basada en diferentes elementos con bandas de Gap diferentes. | 39 |
| Figura 7. Diagrama esquemático de una celda CdTe en configuración superestrato. | 41 |
| Figura 8. Estructura de la celda de Cu (In,Ga)Se ₂ | 45 |
| Figura 9. Estructura heterounión SnS. | 47 |
| Figura 10. Estructura de dispositivo orgánico a) convencional y b) Invertido mostrando la posición de las capas. | 51 |
| Figura 11. Estructura de una celda sensibilizada con tintes. | 56 |
| Figura 12. Estructura de una celda de perovskita. | 58 |
| Figura 13. Consumo energía eléctrica en el mundo TWh. | 60 |
| Figura 14. Generación energía eléctrica en el mundo TWh. | 61 |
| Figura 15. Consumo eléctrico en Colombia por sector. | 62 |
| Figura 16. Participación en el mercado energético solar por países, 10 principales mercados. | 65 |
| Figura 17. Zonas no interconectadas nacionales. | 74 |

Lista de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Parámetros eléctricos de las celdas solares. | 28 |
| Tabla 2. Rendimiento de las celdas de Silicio. | 30 |
| Tabla 3. Rendimiento por arquitectura de la celda. | 30 |
| Tabla 4. Línea de paneles solares Tiger Pro producidos por Jinko Solar. | 32 |
| Tabla 5. Características paneles solares First Solar, tecnología celdas CdTe. | 43 |
| Tabla 6. Paneles fotovoltaicos a base de Tecnología CIS fabricados por Solar Frontier. | 46 |
| Tabla 7. Características de los materiales de las celdas solares a base de películas delgadas. | 47 |
| Tabla 8. Relación de la estructura interna de diferentes materiales orgánicos. | 59 |
| Tabla 9. Proyectos fotovoltaicos a gran escala con mayor representación en Colombia. | 69 |
| Tabla 10. Informe de registros de proyectos de generación: Proyectos vigentes. | 70 |
| Tabla 11. Relación de proveedores de sistemas fotovoltaicos a pequeña escala. | 71 |
| Tabla 12. Resumen objetivos plan energético nacional 2010-2030. | 77 |

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1. Ecuación Factor de forma

Ecuación 2. Eficiencia en una celda solar

Planteamiento del problema

Las ciudades albergan la mayor proporción de habitantes a nivel mundial, estas representan oportunidades y desarrollo, una alternativa para mejorar la calidad de vida de cualquier persona; sin embargo, también representan la concentración de la mayor demanda de recursos con el fin de suplir las necesidades de sus habitantes o en algunos casos permitir un estilo de vida basado en un consumo excesivo de recursos. En los últimos años se ha presentado una expansión demográfica en las ciudades haciendo necesario levantar estructuras destinadas a ser vivienda o centros de trabajo, cuyo funcionamiento y construcción, representan una tercera parte de la demanda energética mundial y cerca del 40% de las emisiones de CO_2 del planeta, alcanzando tasas récord en el 2019 de 10 Gt CO_2 , como consecuencia de que muchos de estos edificios presentan infraestructuras deficientes para lograr un entorno sostenible y la ausencia de políticas de eficiencia energética en estos; el consumo energético mundial final de este sector en el 2019 correspondió a 35556 TWh. (IEA, 2021c). En Colombia, según cifras del Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas DANE, en el 2018 el 77,1% de la población se encontraba ubicada en perímetro urbano y solamente el 23,9% restante en zona rural disperso o centros poblados (DANE, 2018), ciudades como Bogotá representan un alto consumo de energía eléctrica proporcional a la densidad de su población. En el 2017 la demanda de energía eléctrica en el país fue de 66770 GWh y se proyecta que para el 2021 dicha demanda aumente a 78179 GWh (UPME, 2018).

En los índices del Balance Energético Colombiano BECO, la matriz energética que suple la demanda del país se soporta principalmente en centrales hidroeléctricas y

centrales térmicas con una capacidad de producción de 54437 GWh representando el 77% y 14750 GWh con el 21% respectivamente en la producción eléctrica nacional del Sistema Interconectado Nacional SIN (UPME, 2017); es evidente el protagonismo de las centrales hidroeléctricas en la producción eléctrica nacional, esta se presenta por la abundancia de recursos hídricos en el país; sin embargo, a pesar de que estos recursos abundan, no implica que sea la mejor alternativa o la de mayor viabilidad para la generación de energía; actualmente no se puede ignorar el grave impacto social y ambiental asociado a la ejecución de proyectos hidroeléctricos. Otra de las deficiencias de los productores energéticos nacionales es que son sistemas centralizados a los que se les asocian pérdidas ocasionadas por la transmisión de la energía hacia las grandes urbes debido a las largas distancias que deben recorrer y la construcción de grandes estructuras para la transmisión de la energía, las cuales aún no tienen acceso a todas las regiones a nivel nacional. Adicional, la crisis del petróleo que se ha presentado en los últimos años acrecienta la amenaza a la seguridad energética nacional (UPME, 2016b).

Por estas razones en estudios como *el Plan energético nacional: ideario energético 2050* plantea la necesidad de la diversificación de la canasta energética nacional, la difusión de energías renovables y la promoción de sistemas descentralizados (UPME, 2015b), que sean productores de energía supliendo la demanda en los centros urbanos más grandes del país o zonas remotas no conectadas al SIN, evitando los daños ambientales ocasionados por la producción de energía con sistemas centralizados y reduciendo las pérdidas de energía ocasionados por transporte. Con estas necesidades claras la energía solar a base de tecnologías fotovoltaicas ofrece la versatilidad que permite adaptar las instalaciones a cualquier lugar del territorio nacional incluyendo

urbes o territorios remotos, sobre estos últimos el SIN no tiene acceso y, por tanto, sistemas fotovoltaicos autónomos representan una solución para esas zonas no interconectadas ZNI que actualmente deben suplir su demanda energética con plantas a base de Diesel u otros hidrocarburos.

Sin embargo, a pesar del potencial de la tecnología fotovoltaica, no se ha desarrollado la confianza para invertir en la difusión de proyectos que la utilicen como fuente productora descentralizada; se han hecho grandes inversiones en centrales solares por empresas privadas como Celsia, que en el 2017 instaló la primera granja fotovoltaica de Colombia (CELSIA, 2021b) y por el gobierno nacional que espera a 2022 aumentar su capacidad energética a base de FNCER al 12% (Minergía, 2021); en la UPME solo se tiene registros de 164 proyectos con una capacidad de 20 MW a la fecha (U. A. m. E. UPME, 2021), mostrando que aún se está en los primeros pasos en el país para sistemas descentralizados a base de energías fotovoltaicas. En este contexto es necesario difundir en mayor medida el conocimiento y nuevos desarrollos de estas tecnologías, y ofrecer recursos técnicos para mejorar el posicionamiento de la energía fotovoltaica, como una alternativa para la generación de energía limpia, sostenible y confiable, que sea parte de la solución en los temas de seguridad energética del país.

Justificación

El aumento de la demanda energética actual, el uso de fuentes de energías no renovables, la dependencia nacional a las hidroeléctricas y termoeléctricas como fuentes principales del suministro energético, la existencia de zonas remotas en el país sin acceso a la energía eléctrica y los graves impactos a los ecosistemas y las comunidades ocasionados por las formas de producción energéticas actuales, son situaciones que implican la promoción de sistemas de generación de energía descentralizados, a bases de fuentes renovables, ambientalmente sostenibles, al alcance de todos y que cuenten con la capacidad de adaptarse a cualquier entorno. Teniendo en cuenta lo anterior, la energía solar fotovoltaica cumple con todos los requisitos para confrontar estas problemáticas y la accesibilidad que le proporciona el recurso solar a las energías fotovoltaicas genera una ventaja sobre otras energías renovables, ya que la hace disponible en cualquier lugar del planeta y en el país esta tecnología se proyecta como una de las de mayor potencial gracias a que los índices de irradiación solar nacional alcanza una media de 4,0 KWh/m² como lo indica el *Atlas de radiación solar de Colombia* (IDEAM, 2021); otras de las ventajas más importantes es que permite promover un pensamiento de autogeneración en las estructuras presentes en las grandes urbes, disminuir la demanda puesta sobre el SIN y llegar a todos los rincones del territorio nacional, lo que con las fuentes generadoras actuales implicaría grandes inversiones económicas y un gran impacto ambiental.

Adicional, es de tener en cuenta que las fuentes generadoras de energía eléctrica actuales no contemplan los costos para una compensación completa por el impacto social y ambiental que generan durante su ejecución, omitiendo muchos sectores que son gravemente afectados, así como también, para lograr que el sistema eléctrico nacional

alcance todos los rincones del país con estas fuentes implicaría grandes inversiones económicas y un gran impacto ambiental.

Por estas razones, es necesaria una transición energética hacia fuentes limpias, renovables y descentralizadas, la tecnología fotovoltaica con sus características es uno de los mejores candidatos; para crear sistemas independientes, autónomos y sostenibles, siendo posible implementar los en cualquier lugar a pequeña y mediana escala disminuyendo la dependencia a los grandes generadores eléctricos centralizados y con ello los costos que implica la transformación y transporte y ofrecer cobertura total.

A pesar de esto, la energía fotovoltaica representa menos del 1,6% de la participación en la canasta energética del país, esta baja participación se ocasiona por diferentes barreras que pueden estar relacionadas con el alto costo de inversión por kWp y la ausencia de un mercado de oferta competitivo (UPME, 2015a) , sin embargo, dichas barreras se pueden superar si se logra demostrar la viabilidad de esta tecnología, ubicándola como una fuente generadora limpia que garantiza la seguridad energética y provee la opción de independencia al consumidor; para lograr tal objetivo es necesario la revisión del estado actual de la tecnología solar fotovoltaica en el mundo y en nuestro país, reconociendo cuales tecnologías tienen mayor difusión en el mercado global, obteniendo una visión aterrizada y simplificada, identificando las ventajas y desventajas desde el punto de vista técnico que cada una de ellas ofrece. A partir de esta información, se podrá hacer un mejor uso o aprovechamiento de los desarrollos tecnológicos alcanzados, permitiendo conocer y elegir la tecnología que mejor se ajuste a las características geográficas, necesidad y presupuesto de los proyectos solares que se desean estudiar e implementar. De esta forma, se espera contribuir con la disseminación del conocimiento de la energía solar

fotovoltaica, generar mayor confianza y contribuir al objetivo nacional de la UPME de diversificar la canasta energética nacional con fuentes renovables no convencionales.

A partir de esta información, se podrá hacer un mejor uso o aprovechamiento de los desarrollos tecnológicos alcanzados, permitiendo conocer y elegir la tecnología que mejor se ajuste a las características geográficas, necesidad y presupuesto de los proyectos solares que se deseen estudiar e implementar a lo largo del país.

Objetivos

Objetivo General

Analizar comparativamente las principales tecnologías desarrolladas en el campo de la energía solar fotovoltaica, con el propósito de identificar características diferenciadoras, ventajas, desventajas y retos a superar, a fin de lograr una mayor penetración en el mercado nacional colombiano.

Objetivos Específicos

- Identificar las principales tecnologías de celdas solares fotovoltaicas desarrolladas hasta la actualidad, su funcionamiento, composición, arquitectura y eficiencias.
- Determinar las características diferenciadoras de las tecnologías fotovoltaicas desarrolladas, a fin de favorecer su comprensión, disseminación y alcance comercial en el mercado nacional.
- Reconocer las tecnologías fotovoltaicas que cuentan con mejores rendimientos frente a condiciones climáticas y/o geográficas poco favorables o adversas.

Introducción

Las celdas fotovoltaicas utilizan el fenómeno fotoeléctrico y fotovoltaico para generar energía eléctrica a partir de los fotones emitidos por el sol, los cuales al incidir sobre estas estimulan el material semiconductor excitando los electrones presentes en la capa de valencia, aportando la energía necesaria para lograr el salto de la capa de valencia a la capa de conducción y de esta forma se genere el flujo de energía eléctrica; sin embargo para que este fenómeno sea exitoso el material semiconductor debe tener ciertas características, las cuales se obtienen a lo largo de la construcción de las celdas fotovoltaicas. En el mercado actual existe una amplia variedad de celdas fotovoltaicas fabricadas con diferentes materiales semiconductores que como lo muestra la figura 1 han alcanzado rendimientos hasta del 47% (NREL, 2021); sin embargo, para llegar hasta este punto esta tecnología lleva un recorrido en su desarrollo de casi dos siglos, iniciando en 1839 cuando Edmon Becquerel descubre el efecto fotovoltaico en una célula electrolítica, identificando por primera vez la producción de voltaje o corriente en un material cuando se expone a la luz; en 1876 se hizo una unión entre Platino (Pt) y Selenio (Se) que mostraba el fenómeno fotovoltaico, sin embargo, este material mostró un bajo desempeño y tuvieron que pasar un par de años para que se hicieran una unión con mejor productividad, esta vez a base de Oro (Au) y Selenio (Se) que alcanzó un rendimiento del 1%; en 1877 Heinrich Hertz descubre el fenómeno fotoeléctrico, que indica que el número de electrones que se mueven por la excitación de la luz dependen de la intensidad de esta y su energía dependerá de la longitud de onda, este comportamiento particular de la luz no podía explicarse con el modelo ondulatorio, ya que implicaría que los electrones absorben energía de las ondas, sin

tener en cuenta la frecuencia, en 1905 Albert Einstein publica un artículo que ayuda comprender mejor el efecto, en el cual proponía que la luz está compuesta por pequeñas partículas con diferentes cargas de energía asociadas a la frecuencia de radiación, paquetes de energía los cuales llamó fotones; donde cada vez que desaparece un fotón aparece un electrón y su energía de salida será igual a la del fotón desaparecido (Lopez & Moreno, 2005).

En 1918 Jan Czochralski desarrollaba una forma para hacer crecer Silicio cristalino, que evolucionó plenamente después de mediados del siglo XX, en 1953 se descubrió el fenómeno fotovoltaico sobre materiales de los grupos III y V que incluyen elementos como Cadmio (Cd)/Telurio (Te) y que son los materiales que mayor difusión tienen en las celdas delgadas en la actualidad, después de esta fecha se logró un crecimiento de la tecnología fotovoltaica gracias a que se implementaron celdas fotovoltaicas sobre los satélites (Edx, 2021).

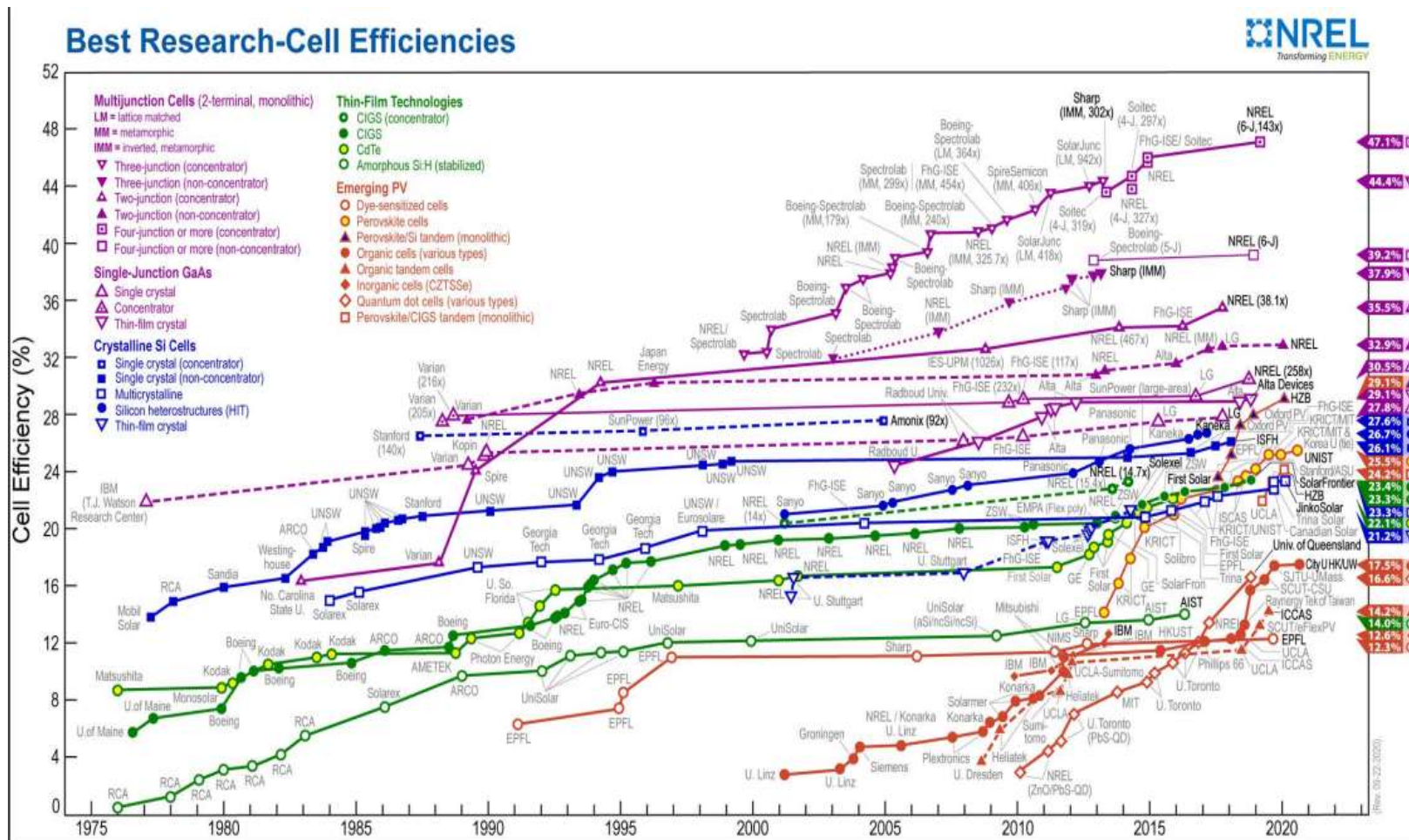
Fue laboratorios Bell en 1954 que desarrolló la primera celda fotovoltaica con un rendimiento del 6% (Wirth et al., 2016) y fue el mismo que en 1962 lanza el primer satélite de telecomunicaciones con energía solar; en los años 60 se despierta el interés por las celdas solares para aplicaciones remotas como faros o señales de navegación offshore y en 1970 se lanza la primera celda solar de alta eficiencia a base de una hetero unión de Galio (Ga) y Arsénico (As), que se convierte en la primera demostración del funcionamiento de los materiales III y V. Uno de los impulsos que recibió el desarrollo de esta tecnología fue la crisis petrolera a inicios de los años setenta, que hizo que varias naciones buscarán fuentes alternativas de energía para disminuir la dependencia de los estados productores del

crudo, que llegaron a utilizarlo como un arma política para lograr sus intereses (Semana, 2005).

En las siguientes décadas la tecnología siguió desarrollándose, países como Alemania en 1999 iniciaron proyectos fotovoltaicos conectados a la red, dándole credibilidad y reconocimiento a este tipo de sistemas, a partir de la fecha la investigación aumentó y consecuentemente el desarrollo de las tecnologías, dando como resultado la disminución de los precios de los módulos (Wirth et al., 2016), el apoyo de los gobiernos para el desarrollo de estas tecnologías es el reflejo de la preocupación ocasionada por el calentamiento global y la presión generada por los acuerdos mundiales para luchar contra el cambio climático, como el protocolo de Kyoto que buscan evitar el aumento de la temperatura del planeta fomentando el desarrollo sostenible, la eficiencia energética, la protección a los sumideros de gases de efecto invernadero y el desarrollo y uso de nuevas formas de energías renovables (ONU, 1998).

Con el desarrollo actual de las tecnologías fotovoltaicas se cuentan con diferentes posibilidades en el mercado energético, que permite elegir entre una amplia gama de materiales, por los cuales se puede apostar para la estructuración de proyectos energéticos en cualquier zona del país, ya sean conectados a la red o completamente independientes.

Figura 1. Récord de eficiencias en celdas solares obtenidas por laboratorios de investigación en el mundo.



Nota: Récord de eficiencias en celdas solares obtenidas por laboratorios de investigación en el mundo. El laboratorio nacional de energías renovables por sus siglas en inglés NREL recopila a detalle las eficiencias de conversión en las tecnologías fotovoltaicas confirmadas mostrándolas por tipo de tecnología, como se puede ver a la fecha las celdas de multiunión son las que mejor rendimiento presentan. (NREL, 2021)

Capítulo 1. Tecnología del Silicio Cristalino.

Gracias a su disponibilidad en el planeta, el Silicio (Si) es el elemento con mayor difusión como material semiconductor representando el 25% de la corteza terrestre, a diferencia del Germanio (Ge) que posee propiedades similares, pero no la misma abundancia en el planeta, adicionalmente su estructura molecular presenta una buena respuesta al espectro solar siendo capaz de absorber radiación con longitudes de onda entre 300 $\mu\text{m.}$ y 1200 $\mu\text{m.}$, más allá del espectro visible; sin embargo, la eficiencia de un módulo está ligada a los procesos de producción de las células solares y el Si debe pasar por diferentes estados como lo muestra la figura 2.

Figura 2. Proceso fabricación del Silicio



Nota: Figura basada en la cadena de producción del Si. (Harry et al., 2016; Wirth et al., 2016)

Producción de celdas a partir de Silicio.

Obtención y purificación del Silicio

La industria metalúrgica y química demanda la mayor proporción de Si, solo una pequeña porción cercana al 9% del valor mundial es destinada a la industria electrónica, a la cual pertenece la industria de la energía fotovoltaica. Para la purificación y la obtención del Si a grado solar, se parte como materia prima de la cuarcita, la cual se funde con carbono (reducción carbotérmica) obteniendo el Si a grado metalúrgico con un 99% de pureza, luego se somete el Si a un proceso de hidroclicación en el cual reacciona Si con Ácido clorhídrico (HCl) produciendo Triclorosilano (SiHCl_3) y sobre esta mezcla se crean columnas de destilación para retirar las impurezas presentes en el Si; para retirar el Hidrógeno y el Cloro de la mezcla SiHCl_3 se utiliza una reacción a la inversa de reducción con Hidrógeno, en este punto se ubican barras de Silicio

policristalino (Si-pc) para que reaccione con el Si en purificación y se retiraran al obtener el grosor necesario de los bloques; finalmente, el Si se somete a una fracturación mecánica, el producto resultante será la materia prima para la elaboración de las obleas. Con el Si a grado semiconductor con una pureza del 99,999999% y se procede a la formación de los cristales característicos de las celdas, se pueden utilizar diferentes métodos y de acuerdo con esto se obtendrán celdas tipo monocristalino, multicristalino y policristalino (Manzanares, 2007), estos procesos de formación requieren altas temperaturas.

Crecimiento Silicio Monocristalino

Existen dos procesos para la producción de lingotes de Silicio Monocristalino (Si-mc) el método Czochralski y el método de zona flotante.

- **Método Czochralski:** consiste en el estiramiento del metal desde un crisol formado de cuarzo de alta pureza a temperaturas entre 1400-1500°C, el cual rota a una presión reducida en una atmósfera de Argón, se inserta el cristal semilla el cual consiste en una varilla de silicio Cristalino, este gira en sentido opuesto al del crisol y se va elevando hasta la formación de los cristales, inicialmente se controla la velocidad disminuyendo el diámetro de los primeros cristales formando un cuello para evitar el impacto del primer contacto de la semilla con el metal ; el proceso debe ser lento para que los cristales se formen en la interfaz líquido-sólido. Durante la formación de los cristales se producen varias contaminaciones por parte del grafito que contiene el crisol de cuarzo y oxígeno procedente de la disolución de este. Actualmente, como método de mejora se emplean campos magnéticos para evitar la contaminación del material por convección.(Manzanares, 2007)

- **Método de zona flotante:** en este método se utilizan barras de Si, las cuales giran en una atmósfera de gas inerte, utilizando una semilla de silicio Cristalino que se ubica en la parte inferior; evitando el contacto con superficies que puedan aumentar las impurezas del material, durante este proceso es posible agregar elementos para dotar el material como semiconductor ya sea tipo n o p (Manzanares, 2007).

Crecimiento Silicio policristalino

Para la producción de este tipo de material se aplica un proceso más barato, en el cual implica que existan fronteras de grano, dislocaciones y defectos puntuales inherentes a su estructura; el método para la producción de estas celdas se conoce como **Método de colada**. Este proceso consiste en el vertimiento de poli silicio en un crisol de cuarzo y el posterior enfriamiento para lograr la solidificación, se producen bloques que posteriormente serán expuestos a cortes para producir bloques más pequeños con una medida máxima de $20 \times 20 \text{ cm}^2$; a partir de estos se producirán las obleas. (Manzanares, 2007)

El crecimiento de silicio por medio del método de colada es uno de los que más impurezas recoge, por esta razón se han desarrollado métodos para mejorar la calidad de las obleas producidas, tales como la *solidificación direccional (DS)*, en el cual, se introduce el Si en un crisol recubierto de Nitruro de Silicio (SiN) y se produce un enfriamiento paulatino al retirar verticalmente el Si del horno generando la formación de una capa solido/Líquido favoreciendo al desplazamiento de las impurezas a una primera capa de la superficie, la cual se cortará posterior al proceso, el *intercambiador de calor* en este se produce un reconocimiento del Si que está compuesto por tres dimensiones en la interfase sólido/líquido y se apoya de una semilla monocristalina para la formación de las obleas y el *método de empuje electromagnético continuo*,

en el cual se utiliza un émbolo de grafito ubicado en la parte inferior del crisol y bobinas inductoras de radiofrecuencia, el Si ingresa lentamente y desplaza el émbolo del material y las bobinas calentarán y evitaran que este se deposite sobre las paredes del crisol (Manzanares, 2007).

Fabricación de las obleas

Después de formar los lingotes, se procede a realizar el corte para obtener las obleas, para este proceso se utilizan sierras que producen obleas desde 200 μm a 500 μm . Usualmente se utilizan sierras de diámetro interno, cuya deficiencia principal es que su espesor es igual al de las obleas, tendiendo a desperdiciar gran cantidad del material. Otras sierras utilizadas son las multihoja o multihilo, generan obleas mucho más delgadas, entre 140 μm a 180 μm , y uno de los métodos utilizados para evitar desperdiciar el material en el corte, se conoce como obleas por crecimiento en el cual se utilizan matrices de Grafito y semillas de silicio monocristalino logrando la formación de las celdas por capilaridad. (Manzanares, 2007)

Texturización

La texturización es un proceso importante para la eficiencia de la celda, sometiéndose a la eliminación de micras de su grosor para quitar irregularidades en la formación, buscando disminuir las pérdidas de energía por reflexión creando estratégicamente una capa de ***micro paredes*** de distribución aleatoria sobre la cara frontal formando los ángulos necesarios para lograr que los rayos de luz choquen entre sí disminuyendo dichas pérdidas y favoreciendo una penetración con mayor profundidad. Este proceso necesita que después del corte se genere una limpieza con sustancias ácidas como ácido clorhídrico HCl y ácido nítrico NO_3H eliminando impurezas y restos orgánicos del decapado.

La texturización suele estar acompañada con la inserción de películas anti-reflejantes que garantizan el recubrimiento de la superficie, apoyando el trabajo de la texturización.

(Manzanares, 2007)

Formación de la Unión PN

El electrodo de las celdas de Si son diodos planos que captan la energía solar y la transforman en energía eléctrica; las propiedades moleculares del Si le permiten actuar como un semiconductor, para mejorar sus propiedades eléctricas se agregan impurezas durante la cristalización; en el caso del semiconductor tipo n se dopa con impurezas como el Fósforo (P), que cargan el material de electrones libres y cumplirá un papel de *emisor* y ocupa usualmente una capa de 1-2 μm en el electrodo; el semiconductor tipo p se consigue al doparlo con Boro (B) confiriéndole las propiedades como *receptor* enriqueciendo la estructura con huecos aceptores de e^- .

Como se mencionó para formar el semiconductor tipo P se utiliza B como dopante, gracias a su estructura tetravalente cargan al semiconductor positivamente, ya que la unión entre el Si con valencia 4 y el B con valencia 3, generan un catión con carga +1 dejando un hueco que posteriormente atraerá los electrones del semiconductor N.

Para la formación del semiconductor tipo N se dopa el material con P, por medio de condensación exponiendo pares de obleas en un horno tubular a temperaturas de 800°C, el P se condensa sobre la superficie dopándolas de una carga negativa, gracias a su estructura pentavalente, permite que al unirse con el Si se produzca un anión con carga -1 (Eco Energy) atrayendo los huecos del semiconductor P. En la estructura de las celdas de Silicio la cara expuesta a la luz de la celda corresponde al semiconductor tipo N.

La unión PN en la celda se formará con la unión de las cargas de los dos semiconductores, las cargas negativas (portadores) del semiconductor tipo n y las cargas positivas (receptores) del conductor tipo p, los elementos cargados de cada semiconductor se atraerán mutuamente y formaran una *zona de deplexión* o zona de agotamiento responsable del *potencial de voltaje*, esta unión forma portadores que pueden ser mayoritarios o minoritarios dependiendo el tipo de semiconductor; en el semiconductor tipo p los huecos serán portadores mayoritarios y los electrones portadores minoritarios y en el semiconductor tipo n los electrones serán portadores mayoritarios y los huecos portadores minoritarios (Wirth et al., 2016). En otras palabras, el dopaje genera la zona de deplexión y esta forma un campo eléctrico que impide el aumento de la difusión de portadores relacionado con el *voltaje de difusión* a el cual se le asocia la energía necesaria para traspasar la zona de deplexión y evitar la recombinación de los portadores mayoritarios que en las celdas de Silicio equivale 0,7 V (Wirth et al., 2016) conocido como *voltaje umbral*. La zona de deplexión eliminara cualquier carga gracias a la fuerza del campo eléctrico que actuara directamente sobre los portadores minoritarios a esta fuerza se le conoce como Drift.

La fuerzas de difusión y Drift generan un equilibrio sobre el diodo, la situación cambia cuando se aplica voltaje o iluminación sobre este; se genera en la zona n un aumento de los portadores mayoritarios que generan que la zona p cree un campo eléctrico adicional, disminuyendo el grosor de la zona de deplexión; ya que el circuito no está conectado será un voltaje de circuito abierto, adicional cuando se hace corto circuito sobre la celda debido a una estrecha zona de deplexión se podrá medir la *corriente de difusión*.

Iluminación de la unión PN

El diodo sin ser iluminado se rige por las fuerzas de difusión y drift para mantenerse en equilibrio, con la iluminación se produce la excitación de portadores; para que un fotón pueda transmitir la energía a un portador, esta deberá ser igual a la *banda de gap* del material, la cual indica la energía necesaria para saltar de la *banda de valencia* la *banda de conducción*, en el Si es igual 1,12 eV (Donde eV representa la energía ganada de un e^- cuando pasa por un potencial de 1 Voltio en el vacío). a 300°K con una longitud de onda de 1100 nm. Los fotones que inciden sobre el material semiconductor cuya energía supera la necesaria para proporcionar el momentón para el salto de banda será liberada como calor y aquellos que no posean la energía suficiente no ejercerán ninguna clase de influencia sobre los electrones. Teniendo en cuenta que la energía que aporta cada fotón está relacionada con su frecuencia, la luz azul puede aportar mayor energía que la luz roja, ya que posee una frecuencia mayor siendo su energía proporcional, aumentando la posibilidad de absorción en materiales con bandas de gap altos. Así mismo, es necesario tener en cuenta que para la generación de portadores de carga electrones-hueco, la celda debe tener una buena *tasa de absorción*, ligada a la absorción de fotones, siendo propia de cada material y determinada por el grosor de la celda. (Wirth et al., 2016)

Es de vital importancia, tener en cuenta que la recombinación determina el tiempo de vida de los portadores y es fundamental para determinar la eficiencia de la celda.

Formación de contactos

En la estructura de las celdas fotovoltaicas con unión pn la recolección de la energía de los e^- se genera en el contacto frontal y estos seguirán el circuito hasta reunirse con el hueco que se ha desplazado hasta la zona p; para la formación de contactos se da por serigrafía en la que se obtienen dedos entre 150 a 200 μm (Manzanares, 2007). o por tecnología de cinta, se utilizan

polvo de metales como Plata (Ag) y Aluminio (Al) o una combinación de estos, los cuales se pondrán sobre una máscara en forma de rejilla que permite su formación, también suele agregarse una mezcla de vidrio molido conocido como *frit*, estos materiales serán fundidos en hornos infrarrojos a temperaturas de 800 °C.

En la formación de los contactos frontales se utiliza preferiblemente pasta de Ag pura o aleada, ya que el Al tiene un efecto de cortocircuito en la celda, se debe tener precaución para evitar la perforación de la unión p-n que alcanza unas pocas micras y mantener una relación de formación en los dedos de mayor altura y menor ancho para evitar que se ocupe mayor superficie de absorción, ya que a mayor cantidad de dedos y menor grosor implica mayor eficiencia de la celda, mejorando la conductividad y disminuyendo la resistividad.

Propiedades y caracterización de las celdas solares a base de silicio cristalino.

Como se mencionó, la celda sin iluminación se encuentra en un estado de equilibrio, en el cual se pueden medir los parámetros eléctricos que definen su funcionamiento, tales como el *voltaje de circuito abierto* (V_{OC}), la *corriente de corto circuito* (I_{SC}), el *Factor de forma* (FF) y la *eficiencia* (η), uno de los niveles de análisis de estos parámetros es la *curva IV* en la cual se correlacionan las variables anteriores de tal forma que se pueda determinar el *punto de potencia máxima* (P_{mpp}) de la celda, su respectiva corriente (I_{mpp}) y voltaje (V_{mpp}) (Wirth et al., 2016). Las características de los parámetros eléctricos se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros eléctricos de las celdas solares.

| Parámetro | Características | Unidades |
|---|---|----------------|
| voltaje de circuito abierto (V_{OC}) | El voltaje de circuito abierto representa el máximo voltaje que se puede obtener de la celda, se mide cuando el circuito se encuentra abierto en dos puntos de la conexión. Cuando la celda no se encuentra conectada su corriente es igual a 0 y se define como la tensión necesaria para que los procesos de recombinación igualen a los de generación, anulando la posibilidad de extraer corriente de la celda. (Flores & Domínguez, 2021). Como lo menciona (Oku, 2017) el V_{OC} tiene una relación directamente proporcional con la banda de gap del material. | V (Voltios) |
| Corriente de corto circuito (I_{SC}); | La corriente de corto circuito representa la máxima corriente que se puede obtener de la celda, se mide cuando se encuentra en un estado de cortocircuito y su voltaje es 0. | A (Amperios) |
| Factor de forma (FF) | Es la medida para analizar la eficiencia de la celda y está dada por la relación entre la potencia máxima de la celda P_{mpp} y el producto entre I_{SC} y V_{OC} y se representa en la por la ecuación 1, teniendo en cuenta: Donde: P_{mpp} = Potencia máxima I_{SC} = Corriente de corto circuito V_{OC} = Voltaje de Circuito abierto <i>Ecuación 1. Ecuación Factor de forma.</i> $FF = \frac{P_{mpp}}{I_{SC} * V_{OC}}$ <i>Nota: Fuente: (Wirth et al., 2016)</i> | % (Porcentaje) |
| Eficiencia (n) | Determina la relación entre la energía producida y la energía incidente; se representa con la siguiente expresión matemática, teniendo en cuenta que: P_{mpp} = Potencia máxima I_{sc} = Corriente de corto circuito V_{oc} = Voltaje de Circuito abierto E = Irradianza A_{cell} = Area de la celda <i>Ecuación 2. Eficiencia en una celda solar</i> $n = \frac{P_{mmp}}{P_{inc}} = \frac{I_{sc} * V_{oc} * FF}{E * A_{cell}}$ <i>Nota: Fuente: (Wirth et al., 2016)</i> | % (Porcentaje) |
| Máxima potencia de producción | Corresponde a la cantidad de Watts producidos por una celda en su nivel máximo de operación y se define como el producto entre el I_{mpp} y V_{mpp} . | W (Watts) |

Nota. Relación de los parámetros eléctricos de una celda solar de Si. (Wirth et al., 2016)

Eficiencia de las celdas de silicio

Uno de los factores más importantes para la eficiencia de las celdas a base de Si es la *pureza* del material ya que a mayor uniformidad en la estructura, mejor será la transferencia de electrones, las células de Silicio monocristalino Si_{mc} tienen una mayor eficiencia en referencia a las de Silicio policristalino Si_{pc} debido a que presentan mayor pureza en su estructura y se ve reflejado en mejores índices de rendimiento como el de *la eficiencia cuántica (EQ)* que evalúa la relación entre los electrones que fluyen por el circuito y los fotones incidentes sobre la celda; y se puede expresar como la relación entre la corriente de corto circuito I_{sc} y la irradiancia espectral incidente (Honsberg & Bowden, 2021)

La pureza se ve gravemente afectada en las celdas policristalinas en los primeros procesos de formación, ya que se pueden crear limitaciones compuestas por cristales con núcleos diferentes conocidos como *límites de grano* que impiden el movimiento de los portadores libres; sin embargo, se han desarrollado técnicas para acortar la diferencia de eficiencia entre las celdas a base Si_{mc} y Si_{pc} , como la eliminación de la primera capa del lingote en la cristalización. Sin embargo, aún se mantienen brechas en el rendimiento entre los tipos de celda a base de Si en la tabla 2. se muestran las características de diferentes tipos de celdas a base de Si y sus eficiencias basadas en la pureza del material. Otro factor que pueden determinar la eficiencia de las celdas es su arquitectura y en el mercado actual se pueden encontrar celdas de unión simple, de doble unión y de hetero unión cuyos rendimientos teóricos se pueden observar en la tabla 3.

También se deben analizar los factores externos como *la temperatura* cuyo aumento puede afectar la potencia de los sistemas fotovoltaicos y la *baja incidencia de radiación* que afectaría el funcionamiento del diodo.

Tabla 2. Rendimiento de las celdas de Silicio.

| Material | Características | Eg | Rendimiento |
|-----------------------|--|-----------|--------------------|
| MONOCRISTALINO | Procesada como un único cristal el cual tiene una forma geométrica tridimensional de un paralelepípedo. Cuya estructura está compuesta por el átomo original más cuatro átomos que completan el enlace covalente del Silicio. | 1.12 | 25% |
| POLICRISTALINO | Estos tienen subsecciones con orientaciones diferentes y en sus interfaces se pueden observar discontinuidades, este material es formada por multitud de monocristales, pero en estos su tamaño puede variar de 1 μ m a 1 mm | | 20.8% |
| AMORFO | No presenta ninguna clase de orden en su estructura. | 1.75 | 13.4% |

Nota. Recopilación de las características de las celdas más importantes del Si (Smets et al., 2015)

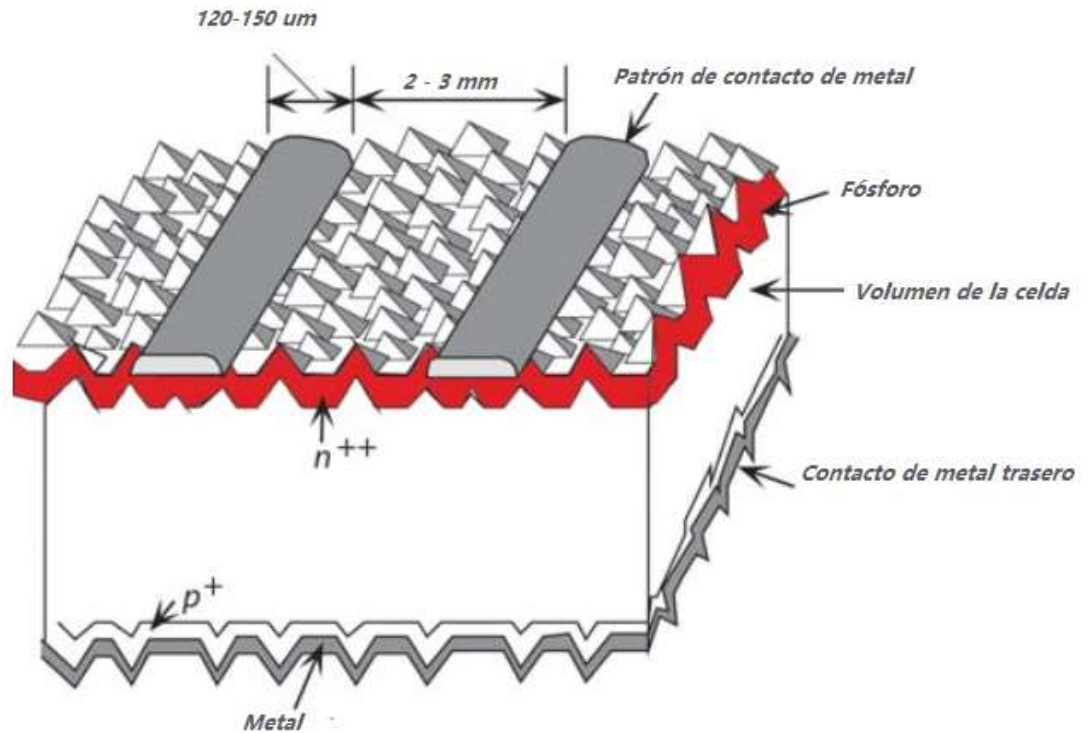
Tabla 3. Rendimiento por arquitectura de la celda.

| Tipo de unión | Rendimiento teórico |
|----------------------|----------------------------|
| UNIÓN SIMPLE | 29.40% |
| UNIÓN DOBLE | 24.50% |
| HETEROUNIÓN | 25.60% |

Nota. Recopilación de las características de las celdas más importantes del Si (Smets et al., 2015)

Esquemas de las celdas solares de silicio

Figura 3. Esquema y partes constituyentes de una celda de silicio.



Nota. Esquema de la estructura de una celda a base de Si, incluyendo estructuras principales. (Green, 2014)

Diseños avanzados para mejorar las celdas de Silicio tipo Wafer

A pesar de que las celdas de Si tienen el mayor reconocimiento en el mercado energético, este material presenta restricciones en referencia a otros materiales disponibles, como la cantidad de energía necesaria para la producción de obleas de calidad, la eficiencia de producción es pobre y presenta defectos en los cristales que afectan su funcionamiento como semiconductores de potencia, además, características propias del material como su bajo *coeficiente de absorción*, una *banda de gap indirecta*, la dependencia de la *pureza* para su rendimiento y la necesidad de un *grosor* de cientos de micrómetros para lograr captar la luz incidente, que afecta su rendimiento por la recombinación por volumen; por esta situación, actualmente se están desarrollando

investigaciones como el desarrollo de tecnología de crecimiento de celdas a base de carburo de Silicio SiC, material con mejores características que el Si (AIST, 2021), tecnologías como la Kerfless Wafering basadas en el crecimiento epitaxial que permitirán disminuir el grosor de las celdas (Gemmela et al., 2019), también procesos como la aplicación de pasivación en el contacto frontal y trasero, optimización en los procesos de fabricación, el desarrollo de otro tipo de tecnologías basadas en la multiunión combinando el Silicio con otros materiales que permiten una mejor absorción del espectro óptico y el diseño de sistemas de enfriamiento que se depositan en la base del módulo para disminuir el calentamiento responsable de las pérdidas en la producción de energía (Bevilacqua et al., 2020); todos los procesos están dirigidos a mejorar la eficiencia y rendimiento de las celdas.

Jinko Solar es uno de los proveedores de las celdas de c-Si más importantes en el mundo, la empresa China ofrece productos a base de mc-Si con diferentes tecnologías, las cuales abarcan desde el aumento de células a la estructura del módulo, hasta la implementación de la tecnología bifacial (Solar, 2021). Las características más importantes de una de sus líneas de paneles solares se resumen en la tabla 4.

Tabla 4. Línea de paneles solares Tiger Pro producidos por Jinko Solar.

| PANEL | TIPO DE CELDA | DESCRIPCIÓN | POTENCIA | EFICIENCIA |
|-------------------------------|------------------------|---|-----------------|-------------------|
| TIGER PRO 60HC | Mono-Cristalino tipo P | MODULO MONOFACIAL | 440-460 W | 21,32% |
| TIGER PRO 72HC | Mono-Cristalino tipo P | MODULO MONOFACIAL | 530-550 W | 21,33% |
| TIGER PRO 72HC-TV | Mono-Cristalino tipo P | MODULO BIFACIAL CON HOJA TRASERA TRANSPARENTE | 525-545 W | 21,13% |
| TIGER PRO 72HC-TV BDVP | Mono-Cristalino tipo P | MODULO BIFACIAL CON DOBLE VIDRIO | 525-545 W | 21,13% |

Nota. Recopilación paneles solares a base de Si cristalinos presentes en el mercado (Solar, 2020a, 2020b, 2020c,

2020d)

Capítulo 2. Tecnología de película delgada

La tecnología en películas delgadas en celdas solares fotovoltaicas se caracteriza por utilizar materiales semiconductores con grosores que puede estar en el rango de 20 nm a 5 μm ; con un área activa únicamente de 7-8 nm., a diferencia de una celda de silicio cristalino (cSi) puede tener un grosor de hasta 300 μm . Se constituyen por dos contactos eléctricos, la capa absorbente y la ventana óptica, esta última está compuesta por una capa buffer y un óxido conductor transparente (TCO) y son fabricadas de manera estratificada. (Vallejo Lozada, 2012). Estas tecnologías permiten reducir el costo de producción, utilizando materiales que por sus características garantizan pocos espesores, gracias a sus bandas de gap directas (Villar, 2010), lo cual implica que pasar el electrón de la banda de valencia a la banda de Gap solo necesitará energía y no momentón, disminuyendo la energía necesaria para generar el flujo de electrones o el coeficiente de absorción que indica un mejor uso del espectro solar.

Células de película delgada de Silicio Amorfo (a-Si)

Las celdas a base de silicio amorfo (a-Si) no se presenta como una combinación de células conectadas, sino como láminas interconectadas; este material no tiene una estructura organizada y, por lo tanto, carece de enlaces saturados, la ausencia de dichos enlaces genera una acumulación de impurezas en su superficie, por estas razones este material no cuenta con buenos índices de movilidad. Entre las características que generan defectos en la estructura esta la ausencia de orden de corto rango, la cual hace referencia a los ángulos y los enlaces con los átomos vecinos, desorden a largo rango el cual está directamente relacionado con la banda gap, enlaces incompletos y defectos de coordinación en referencia a la estructura del c-Si (Baltif et al., 2014) Sin embargo, se puede mejorar su rendimiento introduciendo Hidrógeno a su estructura para completar los enlaces abiertos cumpliendo una función de pasivación de los enlaces rotos

disminuyendo la densidad de los defectos (Murias, 2016), evitando la recombinación de los portadores de carga, aumentando el voltaje de circuito abierto y obteniendo materiales absorbentes con mayor estabilidad, a pesar del dopaje con Hidrógeno aún se presentan defectos ópticos en las capas superiores de las celdas que afectan la absorción de luz ultravioleta influyendo en el rendimiento eléctrico. Este tipo de células pueden generar un rendimiento cercano al c-Si siempre y cuando se mantenga una alta exposición a la luz solar, ya que la absorción espectral tiene el comportamiento de un gap indirecta de 1,7 eV (Baltif et al., 2014) a pesar de tener un gap directo.

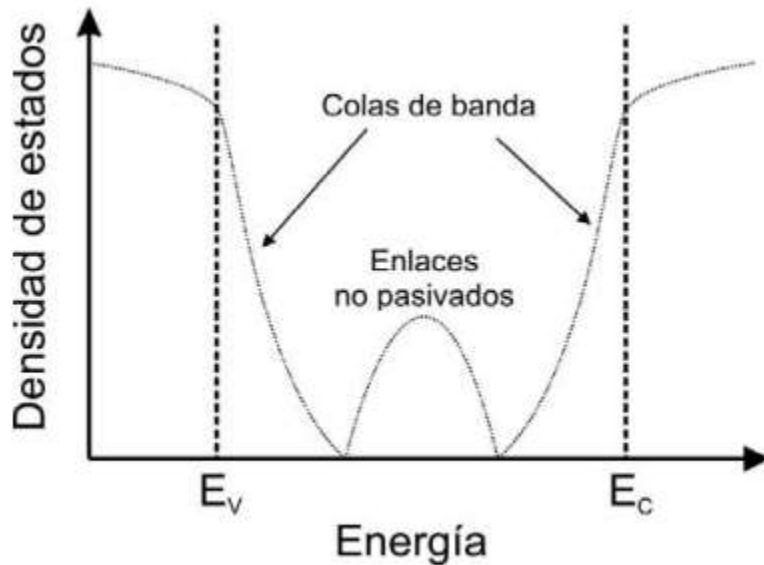
Modelo eléctrico de las celdas de Silicio amorfo (a-Si)

El a-Si se utiliza en células de película delgada y se obtienen por medio de deposición de vapor químico y plasma por sus siglas en inglés PECVD, utilizando gas silano sobre diferentes sustratos que pueden incluir plástico o metales flexibles, proporcionándole su capacidad de adaptación y la estructura tipo delgada que le permite generar energía con grosores menores a 1 μm ; los defectos del material se evidencia en el transporte de portadores de carga, donde el mecanismo dominante será el de Drift sobre el de difusión. Por esta razón las celdas de a-Si utilizan dispositivos Drift conocidos como uniones *pin* o *nip*, sobre los dispositivos para la difusión controlada usados en la unión *pn*.

El material base de las celdas de película delgada es el aSi:H, usado como absorbente, que permite el dopaje con diborano (B_2H_6) y fosfina (PH_3), es un material con un gap *directo* de 1,7 eV, debido a que el desorden en su estructura causa una relajación en las reglas de transición de los portadores, evidencia una baja necesidad de grosor. Sin embargo, a consecuencia de la gran cantidad de enlaces colgantes y la falta de pasivación estos se generan diferentes estados

energéticos en su banda prohibida provocando colas de banda como lo indica la figura 4, que afectan la movilidad de los portadores en presencia de baja irradiación.

Figura 4. Colas de banda a-Si:H



Nota. Grafica la densidad de estados presentas en estructuras no definidas:(Villar, 2010)

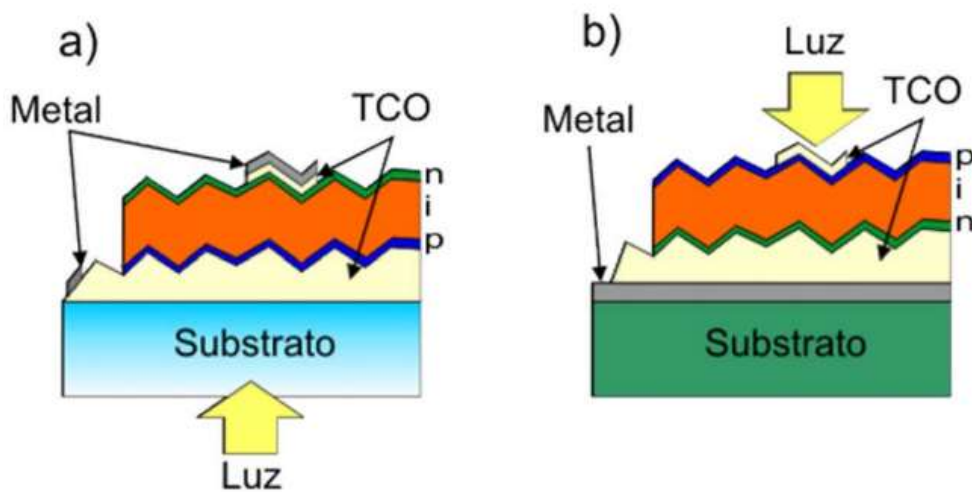
La unión pin o nip

Las celdas de a-Si:H presentan una unión tipo pin o nip, dichas uniones entre semiconductores tipo n, semiconductores tipo p y una capa de Silicio intrínseco sin impurezas, el material *i*, este último permite suplir la deficiencia producida por la desorganización en estructura del a-Si y se ubica en medio de las capas p y n; esta unión genera la formación de un voltaje interno creando la zona de depleción, el transporte de los portadores creados por la iluminación se debe gracias a este voltaje (Oku, 2017), a esta tecnología también se le conoce como HIT Heterojunction with intrinsic thin layer.

La formación del diodo tipo pin o nip se debe a la configuración en la que se depositan las capas formando estructuras en superestrato y substrato, formando las celdas solares de *unión simple* a base de a-Si:H. La estructura de *superestrato* se basa en el crecimiento de una célula pin

sobre un sustrato que será el primero que recibe la luz solar, recubierto con un óxido transparente conductor TCO (Transparent conducting oxide) por sus siglas en inglés. En cuanto a la estructura *substrato* el crecimiento de la célula nip se genera sobre el sustrato y se agrega una capa metálica que sirve como contacto y reflector. Villar citando a Rech and Wagner, 1999 indica que las estructuras en superestrato tienen dispositivos con mayor eficiencia, gracias a la sencillez para elaborar el confinamiento óptico; sin embargo, las estructuras en sustrato no presentan ningún defecto en la capa p, ya que el crecimiento de la capa absorbente es posterior a esta; además, tiene mayor flexibilidad, ya que no exige que el TCO sea transparente, permitiéndole adaptarse a capas metálicas o plásticas (Villar, 2010) como lo muestra la figura 5.

Figura 5. Estructura celdas capa delgada a) Superestrato b) Substrato



Nota. Caracterización de la entrada de luz en las estructuras PIN y NIP. (Villar, 2010)

Uno de los mayores problemas que ha presentado la difusión de las celdas de a-Si, ha sido la degradación que se genera en los dispositivos pin al exponer el material a la iluminación prolongada, cuyo efecto se asocia al efecto Staebler-Wronski y genera la aparición de centros paramagnéticos sobre los enlaces saturados no aislados en zonas donde existen altas tensiones

internas, actuando como centros de recombinación; esta situación se puede corregir exponiendo al material a temperaturas de 200°C durante 30 min. (Villar, 2010)

Rendimiento células de silicio amorfo

En las estructuras más comunes de las celdas de a-Si de superestrato y substrato se obtienen rendimientos del 9%, las de superestrato presentan mayor rendimiento que las de substrato ya que garantizan mayor atrapamiento óptico, sin embargo, en busca de mejorar estos rendimientos se han diseñado celdas en base a uniones múltiples con diferentes materiales que pueden aumentar la banda de gap de la celda en general, haciendo mejor uso del espectro solar, optimizando sus propiedades electrónicas y ópticas, la combinación de dos capas en celdas solares tándem aprovecha dos bandas de gap diferentes y la posibilidad de apilarlas monolíticamente, siempre y cuando exista coincidencia en la enrejado de las capas (Baltif et al., 2014). Los materiales utilizados en las uniones adicionales al a-Si:H, son el carbono (C) que amplían la banda de gap y Estaño (Sn) o Germanio (Ge) que la reducen; o se crean uniones con silicio nanocrystalino (nc-Si), que se obtiene haciendo crecer una capa de pocos nanómetros de c-Si sobre él a-Si:H se alcanzan eficiencias del 14%.

Las multi uniones mejoran el funcionamiento de la celda, ya que se elaboran con materiales cuya banda de gap es considerablemente mayor en referencia a las de a-Si:H, con rangos que se encuentran entre 1,7 a 1,8 eV, lo cual se ve reflejado en mayor V_{oc} y menor I_{sc} ; sin embargo, al presentar una discontinuidad entre las capas de Si-nc y las de a-Si:H se disminuye la eficiencia de las celdas y como consecuencia se presenta unos altos niveles de recombinación en la superficie, pero con procesos como la pasivación se puede mejorar su rendimiento.

De las principales ventajas de esta tecnología se encuentra el menor grosor de las obleas, procesos a menor temperatura para la formación de su estructura (Villar, 2010). Reflejándose en los costos de producción.

Celdas fotovoltaicas materiales III-V

Esta tecnología se caracteriza por tener un alto rendimiento bajo condiciones de prueba estándar STC y altas concentraciones de irradiación, siendo común su uso en aplicaciones espaciales y la generación solar centralizada; presentan rendimientos de hasta 37,9% (NREL, 2021) y una banda de Gap de 1,42 eV directa y está compuesta por elementos del grupo III como el Indio (In), el Aluminio (Al) y el Galio (Ga) y del grupo V como el Fósforo (P), El Arsénico (As) y el Antimonio (Sb). Con estos materiales se pueden formar diferentes combinaciones en la creación de celdas fotovoltaicas pero la más reconocida es la de Arseniuro de Galio (AsGa); sin embargo, los otros materiales se incorporan como celdas complementarias en una estructura *multiunión* (Smets et al., 2015).

Una de las principales restricciones de este tipo de celdas es la poca abundancia del Galio y la toxicidad del Arseniuro.

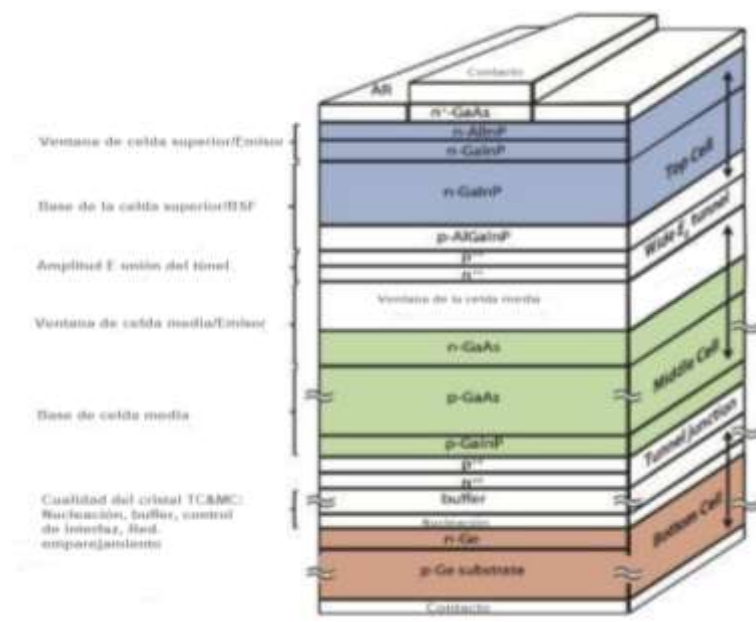
Propiedades de los materiales III-V

El buen rendimiento de este tipo de celdas se debe a la *multiunión* presente en su estructura, utilizan las diferentes bandas de gap de los materiales que la componen, absorbiendo todos los fotones que inciden sobre la superficie, evitando pérdidas por calor en el caso que los fotones presentan mayor energía de la banda de Gap y la pérdida de aquellos que no alcanzan la suficiente energía a la banda de gap del material. La celda se organiza en tres capas de acuerdo con su banda de gap, la de mayor valor se ubica en la cima de la celda captando los fotones de

mayor energía usualmente corresponde a AsGa y las capas posteriores se disponen en orden decreciente de su banda de gap, para ser receptores de fotones de menor energía.

La relación entre la banda de gap y El V_{OC} es directa y con la I_{SC} inversa, es decir aquellas que tengan mayor banda de Gap tendrán mayor V_{OC} y menos densidad de I_{SC} abierto. La conexión de estas celdas se da en serie, lo que implica que el voltaje estará limitado a los menores valores producidos por sus componentes, ya que esta conexión tiene la misma corriente en cada uno de sus componentes y la sumatoria de todos los voltajes de sus componentes. (Smets et al., 2015)

Figura 6. Estructura celda elementos grupo III y V



Nota. Estructura basada en diferentes elementos con bandas de Gap distintas. (Smets et al., 2015).

Células de película delgada a base de Cadmio Telurio (CdTe).

El mercado de las celdas a base de CdTe ha presentan un alto crecimiento en los últimos años, debido a los bajos costos de producción ; ya que el proceso se facilita gracias a las

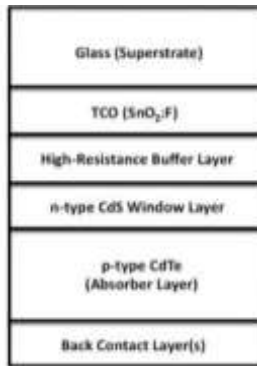
propiedades físicas de sus componentes que al combinarse logran depositarse en la misma tasa sobre la superficie formando estructuras cristalinas, demandando temperaturas que no superan los 500°C, otorgando ventajas en la producción y la facilidad de auto compensación al dopar el material, que al intentar compensar el catión de Cadmio (Cd) con elementos del grupo I o el anión Telurio (Te) con elementos del grupo V, la red automáticamente se auto estabilizara con donantes, dando como resultado que la red presente un cambio en la concentración mínima de aceptores y la capacidad del material para doparse ya sea tipo n o tipo p; todo esto gracias a su relación estequiométrica con una proporción de 50/50, la cual si se altera se presentara una evaporación de cualquiera de los dos materiales manteniendo el equilibrio, es por esta razón que estos actúan entre sí ejerciendo presión para evitar su evaporación y compensándose mutuamente.(Gesser & Bonnet, 2014)

Adicional, tiene grandes ventajas en el funcionamiento en campo ya que puede perder anualmente solo el 0,9 % en su capacidad de funcionamiento durante su tiempo de vida, que se extiende hasta 25 años; sin embargo, entre sus restricciones se encuentra la escases de los minerales como el Te y los graves efectos tóxicos del Cadmio.

Estructura de la celda a base CdTe

Las celdas a base de CdTe son de tipo delgada y tiene una configuración de superestrato, cuenta con seis capas como lo muestra la figura 7, en este diseño la luz ingresa por la base de su estructura el cual corresponde a un vidrio transparente superpuesto y sobre este se deposita el TCO, una capa de CdS con naturaleza tipo n, una capa de CdTe que corresponderá a la capa absorbente de la celda y finalmente el contacto. Es fundamental para el funcionamiento de la celda que la capa CdTe se deposite sobre material tipo n la capa CdS, que le permite tener el papel de capa absorbente. A continuación, se describe a detalle el funcionamiento de cada material en la celda:

Figura 7. Diagrama esquemático de una celda CdTe en configuración superestrato.



Nota. La configuración de superestrato indica la deposición sobre este de los componentes de la célula. (Gesser & Bonnet, 2014)

- **Material superestrato:** los materiales del superestrato suelen ser vidrios de silicato de Bario, Borosilicato y sosa-cal; que permiten la deposición de los TCO, se suelen utilizar altas temperaturas para su formación buscando evitar defectos de densidad; sin embargo, en el vidrio de Sosa-cal el proceso se debe mantener una temperatura de entre 550 y 570 °C para evitar distorsiones mecánicas.
- **TCO (Transparenting conducting oxide):** esta capa proporciona una vía para conducir los electrones del lado tipo n del dispositivo; por lo tanto, debe ser transparente para garantizar la transmisión de la energía. Usualmente el material está compuesto por fluorita dopada con Oxido de Estaño ($\text{SnO}_2\text{:F}$). Es un componente inerte, con un bajo nivel de emisividad y bajo nivel de reactividad con otros componentes, que evitan reacciones ante la humedad y ataques de Sodio (Na) en el caso de que el material del superestrato sea a base de Sosa-Cal.
- **Capa de amortiguación:** también conocida como capa de alta resistencia (HRT) por sus siglas en inglés, está ubicada entre el TCO y la capa de CdS, entre sus trabajos está permitir una compensación cuando la capa de CdS se haga más delgada, permitiendo que la capa pCdTe tenga un amplio espacio-carga, manteniendo el equilibrio evitando que el

dispositivo funcione por la recolección de voltaje, y también evitar la recombinación entre el TCO y la capa CdS.

- **Capa CdS:** corresponde al compañero dopado tipo n de la heterofase de la celda, sin embargo, la unión se dará entre la mezcla de CdSTe; la deposición de esta capa se genera por la deposición por baño químico (CBD).
- **Capa CdTe:** corresponde a la capa Activa de la celda dopada positivamente, de sus mayores ventajas está que la tasa de deposición es una de las más bajas entre las celdas fotovoltaicas alcanzando únicamente 425° C. Al depositar la capa CdTe se difunde con la CdS formando la capa CdSTe, esta difusión genera la unión que principalmente disminuye la banda de gap de los materiales iniciales. Para la activación de esta capa se utiliza $CdCl_2$ en una solución de alcohol o agua por medio de rocío proceso que demuestra un mejor tiempo de vida de los portadores minoritarios.
- **Contacto trasero:** esta capa ofrece una baja resistencia en el camino de la energía y es una clave importante en el funcionamiento de la unión. Su deposición se realiza por medio de difusión, utilizando Cu como material predilecto, aunque se pueden utilizar otros materiales del grupo I como la Ag y el Au o del grupo V como el Bi, P, Sb o As. Para su deposición es necesario tener en cuenta que se debe eliminar los residuos del proceso del $CdCl_2$. (Gesser & Bonnet, 2014)

Rendimiento de las celdas a base de CdTe

Las celdas a base de CdTe presentan un rendimiento en módulo de 18.6% (Belyakov, 2019) y la implementación de estructuras de tipo superestrato permiten el desarrollo de celdas a base de CdTe con la tecnología Roll to roll, que mejoran la versatilidad para su despliegue y disminuyen costos de producción, a pesar de que tienen menor rendimiento que las celdas a base de Silicio

Cristalino, demandan menor proporción de material para su fabricación. Uno de los principales productores de celdas a base de CdTe es la empresa First Solar (First Solar, 2021c), los productos de sus principales líneas se resumen en la tabla 5.

Tabla 5. Características paneles solares First Solar, tecnología celdas CdTe.

| Panel | Tipo de celda | Descripción | Potencia | Eficiencia |
|------------|--------------------------------|-------------------|-----------|------------|
| SERIES 4TM | CdTe Thin film UP to 264 Cells | Modulo Monofacial | 110-122 W | 17,0% |
| SERIES 6TM | CdTe Thin film UP to 264 Cells | Modulo Monofacial | 420-450 W | 18,2% |

Nota. Correlación de las celdas solares a base de CdTe en el mercado. (First Solar, 2021a, 2021b)

Células solares basadas en Calcopiritas

Las celdas a base de calcopiritas presentan una variación entre los elementos que la componen; entre las más comunes son las CIS ($CuInSe_2$) y CIGS ($Cu(In, Ga)Se_2$), presentan una banda de gap entre 1,1 y 1,4 que los mantienen entre los valores de mayor eficiencia teórica. Entre los diferentes componentes formados por calcopiritas se pueden encontrar rendimientos desde 11.4% con el $CuInSe_2$ hasta 22,6% con el $Cu(In, Ga)Se_2$, estos rendimientos se deben a los elevados valores del coeficiente de absorción, que abarca un espectro solar entre 100 y 300 nm, la absorción se puede dar en materiales con grosores inferiores a 3 μm gracias a su gap directo, lo que dota a la celda de una gran actividad de absorción (Marti Valls, 2016). Las capas a base de ($Cu(In, Ga)Se_2$) muestran un rendimiento de hasta el 3% superior a $CuInSe_2$ no solo por la diferencia de la banda de gap, si no por el efecto benéfico del Ga sobre la estructura; es de tener en cuenta que las bandas de gap amplias muestran un menor rendimiento que las de menor rango (Rau & Schock, 2014).

Estructuras de las celdas a base de $Cu(In, Ga)Se_2$

Son celdas de heterounión con una estructura tipo *substrato*, es decir, el sustrato que será la base mecánica de las otras capas está situado en la parte inferior de la celda; la heterounión

permite altos voltajes en cada capa, gracias a la banda de gap independiente de cada una de estas.

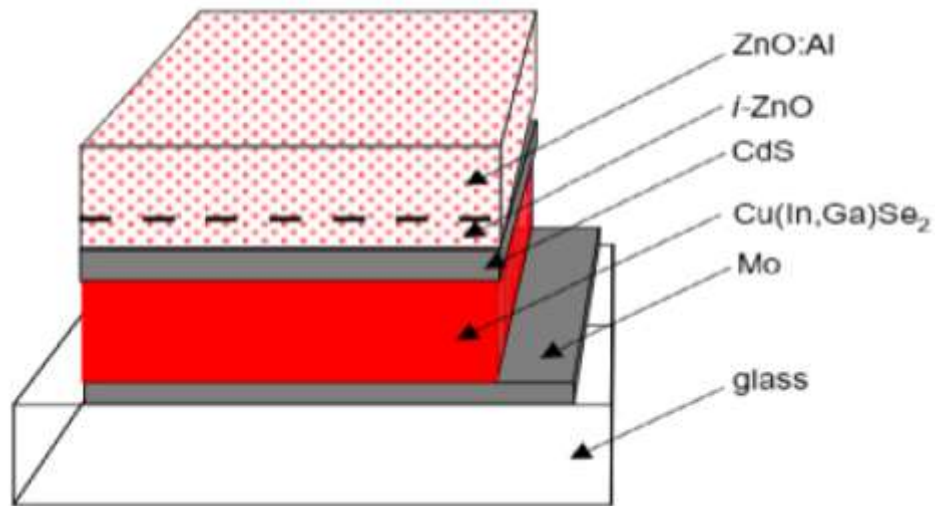
La estructura de heterounión de las celdas a base $Cu(In, Ga)Se_2$ presenta la siguiente secuencia

$ZnO/CdS/Cu(InGa)Se_2$ con una ubicación como se muestra en la figura 9, cada una de las

capas tienen una función específica como son:

- **Substrato:** Capa de vidrio soda-cal.
- **Capa Molibdeno (Mo):** Capa Mo con un grosor de $1\mu m$
- **Capa de $Cu(In, Ga)Se_2$:** Se deposita sobre la capa Mo y corresponde a la capa absorbente de la celda con un grosor de 1 a $2\mu m$.
- **Capa de CdS:** se deposita sobre la capa absorbente por medio de un proceso de baño químico (CBD), alcanzando un grosor de $50\mu m$
- **Capa de $i-ZnO$:** Capa intrínseca sin dopaje que alcanza un grosor de 50 a $70\mu m$
- **TCO Capa de $ZnO:Al$:** esta capa se utiliza como capa ventana debido a su alta banda de gap y su transparencia, permitiendo que la luz se difunda hasta la capa absorbente (Rau & Schock, 2014).

Figura 8. Estructura de la celda de Cu (In,Ga)Se₂



Nota. Estructura de las celdas a base de Perovskitas identificando cada uno de sus componentes (Rau & Schock, 2014)

El In y el Ga son materiales con poca disponibilidad en el planeta, esta situación puede dificultar el desarrollo de las celdas a base de la tecnología CIGS a gran escala; por esta razón, se han realizado investigaciones para encontrar materiales que puedan reemplazarlos y tengan mayor disponibilidad, encontrando las Kesteritas (KZTS) que son heterouniones que tienen la misma estructura de las calcopiritas pero reemplazando el In y el Ga por el Zn y el Sn que tienen mayor abundancia (Rau & Schock, 2014). Frontier Solar es una de los principales productores de módulos con tecnología CIS, que garantiza mejor rendimiento generando más electricidad que las celdas de Si en condiciones operativas normales, la clave para que tenga una mejor tasa de retorno; este tipo de celdas responden mejor a las altas temperaturas, manteniendo un buen rendimiento incluso en zonas desérticas, presentan el efecto de impregnación de luz que indica que las celdas mostraran mejor rendimiento después de los primeros días de operación y una mejor respuesta ante la proyección de sombras perpendiculares, ya que solo afectara la zona bajo la sombra y no todo el funcionamiento del módulo (SOLAR FRONTIER, 2021a). En la tabla 6 se muestran los principales productos distribuidos por la compañía.

Tabla 6. Paneles fotovoltaicos a base de Tecnología CIS fabricados por Solar Frontier.

| PANEL | TIPO DE CELDA | DESCRIPCIÓN | POTENCIA |
|-----------------|----------------------|--------------------|-----------------|
| SFK180-S | CIS Thin film | MODULO MONOFACIAL | 180 W |
| SFK185-S | CIS Thin film | MODULO MONOFACIAL | 185 W |

Nota. Relación de los paneles solares en el mercado a base de tecnologías Calcopiritas. (SOLAR FRONTIER, 2021b, 2021c)

Células de película delgada a base de sulfuro de estaño (SnS)

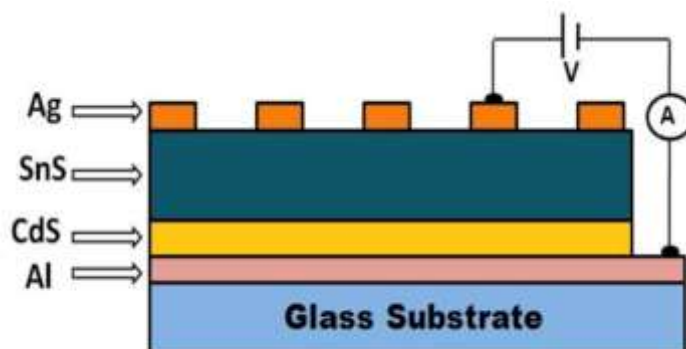
Esta tecnología ha demostrado gran versatilidad para la fabricación de celdas solares gracias a sus altos coeficientes de absorción y su banda de gap de 1,3 eV; los cristales de SnS tienen una estructura ortorrómbica donde cada átomo de estaño se encuentra coordinado con seis de azufre, estos cristales cuentan con dos capas, la primera fuertemente unida y la segunda con una unión débil; esta última forma una estructura de doble capa. Para la formación de las películas se utilizan métodos de deposición química, electrodeposición, deposición por baño químico, entre otras (Yamashita & Tanaka, 2010).

Propiedades de las celdas SnS

Este tipo de celdas presentan una concentración de portadores que alcanzan tasas de 10^{17} cm^{-3} , una movilidad de $500 \text{ cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ s}^{-1}$, la absorción de luz se da en grosores de $1,5 \mu$ y presentan fotoconductividad en la presencia de ondas ultravioleta y cerca del infrarrojo. Existen diferentes métodos de deposición de este tipo de celdas y factores la temperatura de deposición sobre el sustrato puede afectar sus propiedades físicas y químicas. A las celdas de p-SnS pueden formar uniones efectivas con materiales del grupo II-V como el CdS y el ZnS . (Yamashita & Tanaka, 2010).

Esquema de las celdas.

Figura 9. Estructura heterounión SnS



Nota. Identificación de cada uno de los componentes de las celdas a base de SnS. (Yamashita & Tanaka, 2010)

Tabla 7. Características de los materiales de las celdas solares a base de películas delgadas.

| Material | Características | Rendimiento | Grosor | Capa Activa |
|---------------------|---|--------------|--------|-------------|
| Si Amorfo | Material a base de Si con ausencia de orden en su estructura, | 9-14% | 5 um | 8 nm |
| III-V | Celdas a base de AsGa con un excelente rendimiento en condiciones STC y alta radiación, son utilizadas en sistemas satelitales. | 37.9% | | |
| CdTe | Celdas que se adaptan a tecnologías flexibles como el roll to roll | 18.6% | | |
| Calcopiritas | Celdas a base de CIS ($CuInSe_2$) y CIGS ($Cu(In, Ga)Se_2$), | 11.4 % 22,6% | 3 um | 1-2 um |
| SnSb | Celdas con altos coeficientes de absorción y movilidad | 25.5% | 1.5 | |

Nota. Relación de las características de mayor relevancia de las celdas solares de películas delgadas.

Métodos de deposición de las películas delgadas

Deposición de baño químico (CBD)

Es una técnica basada en el control cinético de los iones participantes, controlando la precipitación de la solución de un compuesto dentro de un sustrato adecuado, esta técnica es utilizada usualmente para la deposición de celdas CdTe y SnS.

En el caso del SnS se necesita un precursor de estaño que corresponde a $SnCl_2/SnCl_4$ un precursor de azufre $Na_2S_2O_3$ y amoníaco como agente acomplejante, el baño químico se completa a temperaturas entre 60 y 80°C, las celdas producidas por este método son uniformes homogéneas y densas sobre el sustrato (Yamashita & Tanaka, 2010).

Depósito químico en fase vapor asistido por plasma PECVD (Plasma enhancing chemical vapour depositing).

Este método permite formar grandes estructuras de película delgada utilizando el principio de descomposición de gas a plasma, dopa la celda para incluir gases como la fosfina (PH_3) y el trinitil Borato (TMB), para la formación de la estructura son necesarios gases químicos como el Silano (SiH_4), Hidrogeno (H_2) y Metano (CH_4). Para la formación del plasma un compuesto de electrones, iones, moléculas neutras y radicales libres se exponen los gases a una descarga de radiofrecuencia, este proceso se puede llevar a cabo entre temperaturas entre 150 y 300 °C.

Este proceso permite mejorar el rendimiento de materiales como el a-Si, con su deposición se mejora la conductividad en oscuridad y la fotoconductividad de la celda en general, por este método se incorpora el Hidrógeno al a-Si (Baltif et al., 2014).

Deposito HW CVD (Hide wire chemical vapour depositing) o CVD-Catalítico

Este proceso se basa en la descomposición del Silano (SiH_4) o una mezcla de Silano con Hidrógeno (SiH_4/H_2) en un reactor de vacío donde un filamento es calentado resistivamente a temperaturas entre 1500 y 200 °C, este proceso se logra por la descomposición catalítica de los reactivos al chocar con el filamento se forma hidrógeno molecular (H_2) y silicio (Si) elementos bases para las reacciones secundarias responsables del crecimiento del material (Villar, 2010).

Depósito Epitaxial

En este método de deposición de las capas a sobreponer son depositadas sobre un substrato cristalino de tal forma que adoptan su estructura de red; es utilizado para la formación de semiconductores III-V, es un proceso costoso similar a los de elaboración de Microchips (Smets et al., 2015).

Capítulo 3. Tecnologías a base de materiales orgánicos

Celdas solares orgánicas CSO (Polímeros).

Las celdas solares orgánicas presentan un rendimiento de 18,2 % (NREL, 2021), su material semiconductor se basa en cadenas de carbono hibridizado de la forma sp_2 que forman una estructura plana hexagonal, y usan un mecanismo diferente de separación de cargas, ya que con la absorción de luz se generará un *excitón*, que seguirá siendo el electrón-hueco unidos y deberá ser separado para generar los portadores de carga; esto mediante la influencia de electrodos que crean el campo eléctrico necesario para romper la simetría del dispositivo.

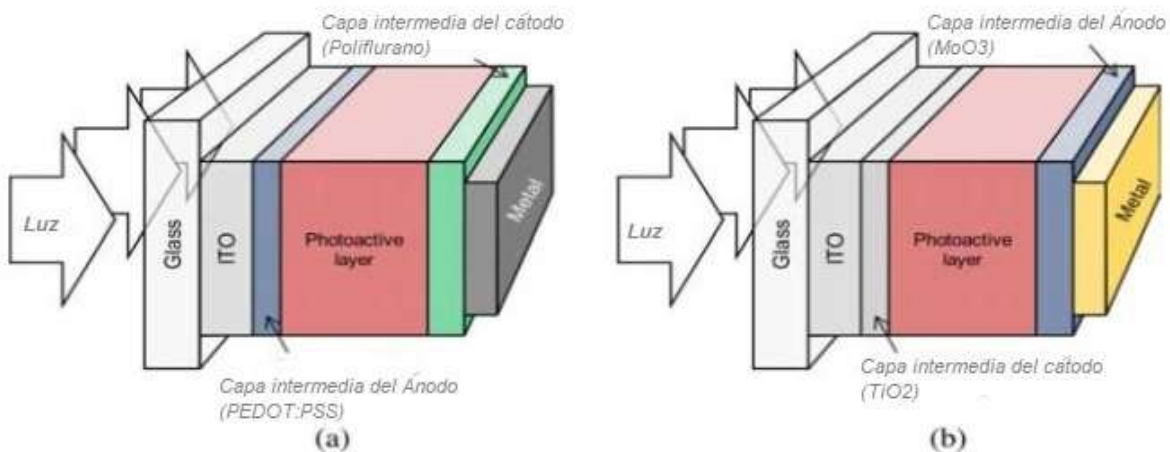
De las ventajas de las células solares orgánicas se encuentra su capacidad para ser depositadas sobre diferentes materiales en grandes áreas, las técnicas de producción son a bajas temperaturas permitiendo sublimar moléculas orgánicas y formar películas delgadas bien definidas, las impurezas generan pocos efectos sobre el material debido a la ausencia de una red definida a diferencia de los materiales cristalinos y la banda directa del material requiere bajas longitudes de absorción óptica, dotándolo de altos coeficientes de absorción donde una celda con un grosor de 100 a 200 *nm* logra la absorción completa de la energía necesaria para lograr el estado de excitación, generando un impacto positivo en el peso de la celda, características que permiten formar estructuras que se adaptan a diferentes dispositivos, siendo una tecnología prometedora para las celdas fotovoltaicas. (Credginton, 2014)

Semiconductores orgánicos

Las propiedades semiconductoras de los elementos orgánicos se deben a su configuración electrónica, al formar cadenas de carbono de la forma sp^2 , permiten la creación de una estructura plana hexagonal ya que forma ángulos de 120° , con solapamiento de orbitales y enlaces iguales,

este tipo de configuración se presenta en el grafito y los semiconductores planos y se caracteriza por formar una unión lateral entre carbonos formando un enlace sigma σ y pi π .(Credgington, 2014)

Figura 10. Estructura de dispositivo orgánico a) convencional y b) Invertido mostrando la posición de las capas.



Nota. Celdas orgánicas con arquitecturas distintas a) estructura convencional b) estructura BHJ de heterounión gruesa. (Credgington, 2014).

Al obtener una estructura plana por la conjugación de los dos orbitales 2pz responsables de la formación del enlace π , se forman estados por deslocalización de π/π^* , donde los enlaces π como uniones resultantes de una superposición simétrica se conocen como *vinculación* y los enlaces π^* resultantes de una superposición asimétrica se conocen como *anti-vinculación* y en una estructura de carbonos se ocuparan los estados del π dejando los estados π^* libres con una diferencia energética de la banda prohibida gap E_g , si se aumentan las cadenas conjugadas se puede disminuir la banda prohibida, es decir si se controla el grado de polimerización; se permite el aumento el rango de absorción óptico de las moléculas.

La banda de gap definido para estos materiales se define como la diferencia entre el HOMO (Highest occupied molecular orbital) y el LUMO (Lower unoccupied molecular orbital) definiéndose como una propiedad molecular. Gracias a la banda directa del material se necesitará poco espesor para la absorción de la energía necesaria para la transición del estado $\pi - \pi^*$, sin embargo, la absorción de fotones no es suficiente para la generación de corriente se debe generar la separación de cargas del excitón, la baja constante dieléctrica significa que el excitón puede permanecer en un estado de transferencia de carga a través de la interfaz, para esta separación la energía de unión debe ser menor a la del excitón pero mayor a la energía térmica.

Con la absorción de un fotón que tenga un nivel energético mayor que la E_g del material se logra el *estado de excitación* que promueve el electrón en estado estable pase a al primer colector vibronico del primer estado excitado electrónico, dejando una molécula neutra en estado excitado que es lo que se conoce como *excitón*, esta situación se debe a cuatro condiciones:

- Baja constante dieléctrica (ϵ) de los materiales orgánicos.
- Los materiales electrónicos orgánicos tienen un comportamiento suave, a consecuencia de que en el medio se genera el aumento de la polarización y con la ruptura de la conjugación local del estado π^* anti-unión se genera una relajación geométrica de la molécula. En los materiales orgánicos el transportador de carga del material se conoce como *polarón* compuesto por la carga en sí misma y su distorsión molecular.
- El transporte de los portadores es una activación limitada gracias a la naturaleza polarónica del material, la carga de los portadores guiará la auto localización permitiendo la transferencia del segmento conjugado a otro en el que exista mayor necesidad.

- El transporte de excitones presenta un desorden limitado, donde la migración de un segmento a otro se da por un polaron. (Credgington, 2014)

Estructura de las celdas solares orgánicas

La estructura de las celdas solares orgánicas se basa en un material orgánico absorbente recubierto por dos electrodos que le permiten la disociación de los excitones, absorbiendo los electrones y huecos formados, a consecuencia de que el material presenta baja movilidad de portadores es necesario que uno de los electrodos sea transparente. Las celdas solares orgánicas presentan dos posibles estructuras, la primera se le conoce como *normal*; presenta un sustrato que puede ser plástico o metal, una capa depositada en la base del sustrato de óxido de indio y estaño (ITO) que recoge la corriente de huecos, una capa de Aluminio o plata como material conductor de la corriente de electrones en la cima de la estructura; la segunda estructura se desarrolló posteriormente y puede ofrecer mayor estabilidad, caracterizada por su estructura invertida, a este tipo de celdas se les conoce como celdas de hetero unión gruesa (BHJ), cuya capa activa está compuesta por polímero: Furanos, estos materiales cuentan con bajas bandas de gap con una asimetría que les permite mayor absorción alcanzando corrientes de 15 mAcm^{-2} .(Credgington, 2014)

Electrodos de las celdas orgánicas

Para la selectividad de cargas los electrodos utilizan capas intermedias que modifican sus funciones y le evitan el enfriamiento del excitón; proporcionando un régimen limitado por cada electrodo evitando que los electrones pasen al electrodo colector de huecos y viceversa. Una de las capas intermedias de las celdas solares orgánicas está compuesta por una solución coloidal a base de agua entre el *poli(3,4-etilendioxitofeno) PEDOT** y el *poli(estirenosulfonato) PSS⁻*.

Como limitantes de este tipo de materiales se tiene que para la generación del portador en las CSO el ancho de banda es igual al 1,9 eV, usualmente las celdas de mejor rendimiento tienen bandas a 1-1,5 eV, esto se debe a que las CSO tienen una diferencia entre el HUMO y el LUMO más amplia, el voltaje de circuito abierto está directamente en relación con la pérdida de energía de la formación de portadores, su formación se puede ver afectada por la relajación del estado de calentamiento inicial con sus traslados a los bordes y el exceso de energía requerida para conducir la separación de carga en la hetero unión, en dicha separación de portadores se requiere tomar más energía que la que se necesita usualmente para formar un excitón y su eficiencia se puede ver afectada por la corta vida de los excitones y la baja tasa de disociación espontánea de estos.

La fotocorriente de las celdas fotovoltaicas orgánicas se puede aumentar si se facilita la transferencia de cargas de una molécula heterogénea cercana, lo que implica que se puede mejorar el rendimiento si se combinan dos capas semiconductoras formando una heterounión plana, esta estructura permite la disociación del excitón por medio de la energía libre ganada de la transferencia de un electrón del LUMO del material donante al LUMO del material aceptor o un hueco del HOMO del donante al HOMO del material aceptor (Credginton, 2014).

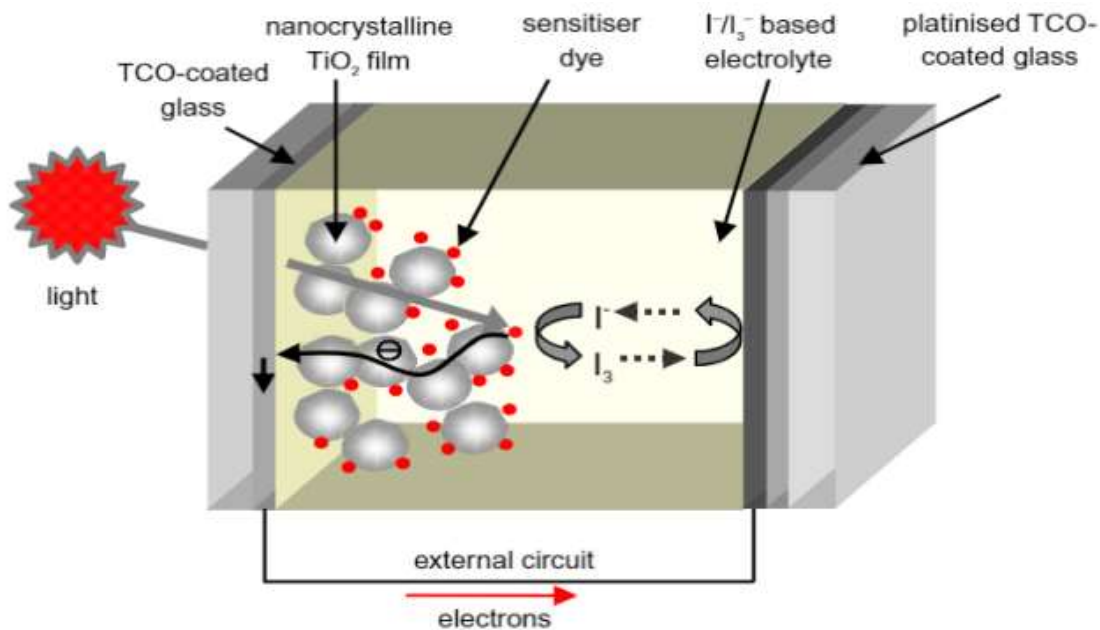
Celdas sensibilizadas con tintes.

Las celdas solares sensibilizadas con tintes pueden alcanzar rendimientos del 13% (NREL, 2021), basan su funcionamiento en una capa de óxido mesoporoso, compuesto por partículas de tamaño nanométrico las cuales han sido sintetizadas en conjunto para garantizar la conductividad del material, el óxido utilizado por prevalencia es el TiO_2 , que actúa como substrato semiconductor *tipo n*, esta es una capa nanocrystalina a la cual se le agrega un tinte sensibilizador, dichas capas se encuentran sumergidas en un solvente orgánico líquido

usualmente formado por Yoduro y Triyoduro I^-/I_3^- . Para la excitación del material se genera con la fotoexcitación del tinte sensibilizador (TS) y la posterior inyección de un electrón a la capa de conducción del óxido lo que genera que se forme un catión en el TS, que se compensará con un electrón procedente del electrolito; este proceso se conoce como una reacción de regeneración, la compensación al yoduro se genera por la reducción del triyoduro, completando el circuito eléctrico por vía externa.

Para la formación de la estructura de este tipo de celdas su fabricación se realiza sobre un TCO, el cual usualmente corresponde a óxido de Estaño dopado con Fluorita $SnO_2:F$ (FTO); posterior se genera el depósito de la capa semiconductor de TiO_2 como nanopartículas agregadas por screen-printing y por sinterizado a temperaturas $\sim 450^\circ$ garantizando una buena interconectividad entre las partículas. La absorción del tinte sensibilizador sobre la capa semiconductor mesosfera, se logra con la inmersión de esta en una solución del tinte el cual corresponde al Bipyridina Rutenio (II) (Grätzel & Durrant, 2014).

Figura 11. Estructura de una celda sensibilizada con tintes.



Nota. Componentes de una celda sensibilizada con tintes y proceso de excitación de generación de energía partiendo de la excitación del tinte. (Grätzel & Durrant, 2014).

Celdas solares de Perovskita

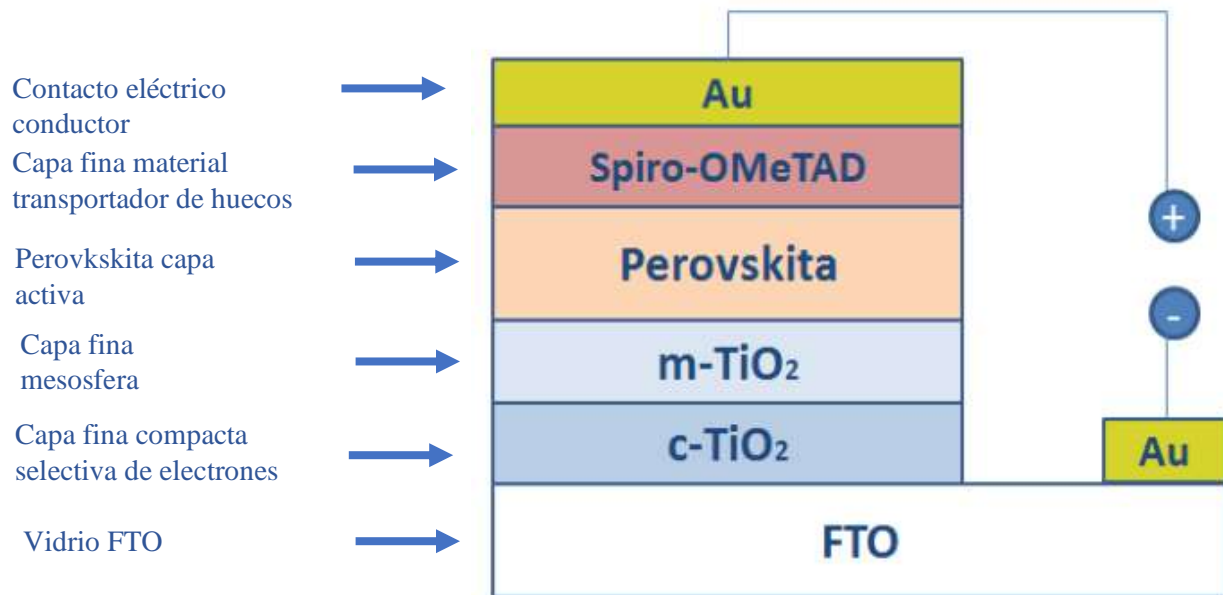
Este tipo de celdas presentan un rendimiento en laboratorio máximo de 25,5% (NREL, 2021), se puede representar por la fórmula molecular general BAX_3 donde, B es un catión metálico usualmente Plomo (Pb), A es otro catión, pero más voluminoso que puede ser el Metilamonio o el Cesio (Cs) y X es un anión haluro que puede ser Bromo (Br) o yodo (I) y los sistemas cristalográficos en los que se pueden encontrar son ortorrómbico, ortogonal o cúbico. Gracias a su band gap de 1,0 eV, a las propiedades fotoeléctricas como el alto coeficiente de absorción, la elevada movilidad intrínseca de los portadores libres, su baja tasa de recombinación, el bajo nivel de defectos y su tolerancia a estos; hacen que las Perovskitas sean un material eficiente, tanto para la absorción, como para la producción de energía. Además, debido a su gran

capacidad de absorción, este material puede alcanzar grosores de 400 *nm* clasificándose en celdas de película delgada (*thin film*) (Tao et al., 2019).

Arquitectura de las celdas Perovskita

Para lograr la separación de cargas es necesario incluir dos contactos distintos que se encarguen de la separación de electrones y huecos, la capa selectiva de electrones ESL y la capa selectiva de huecos HSL respectivamente, las cuales forman una estructura multicapa de materiales semiconductores compuesta por cinco capas como lo muestra la figura 10, la cual debe estar compuesta por un contacto eléctrico conductor, un vidrio recubierto con Óxido de Estaño dopado con Flúor, el cual será el *sustrato*, una capa fina de dióxido de Titanio (TiO_2) compacta como colector de electrones, una capa fina del mismo conductor mesoporosa, la capa de perovskita que será la capa activa y una capa fina de transportador de huecos (HSL). Los fotones inciden sobre el FTO, generan la formación de un electrón-hueco en la capa de Perovskita activa, con la ayuda de las capas selectivas de huecos y electrones se separan los electrones, el cual se dirigirá hacia la capa mesosfera pasando hacia el contacto eléctrico y el hueco se difundirá hasta el contacto eléctrico trasero (Ramos Terrón, 2018).

Figura 12. Estructura de una celda de perovskita



Nota. Componentes de una celda Perovskita polarizada. (Ramos Terrón, 2018; Terron, 2018)

Desarrollo de las celdas de Perovskitas

Las celdas Perovskitas fueron desarrolladas como solución a la sensibilidad de los materiales orgánicos frente a las condiciones ambientales, que por sus propiedades higroscópicas pueden presentar degradación por hidrólisis; por esta razón las celdas a base de perovskita ($CsPbBr_3$) siguen siendo materiales orgánicos, pero pueden aumentar la vida útil de la celda.

Tabla 8. Relación de la estructura interna de diferentes materiales orgánicos.

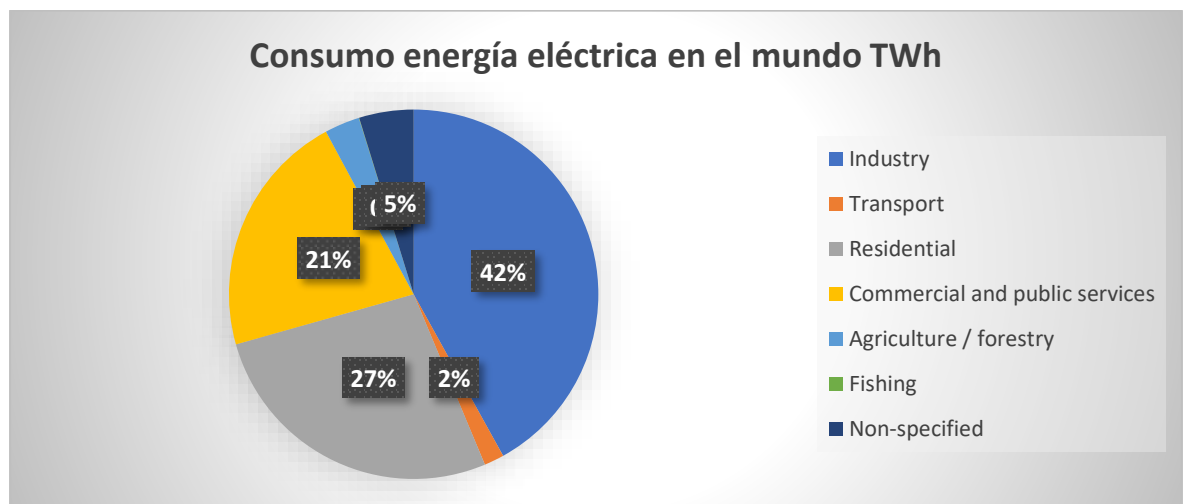
| ESTRUCTURA INTERNA CELDAS SOLARES MATERIALES ORGANICOS | | | | |
|--|--|---------|-------------|------------------|
| MATERIAL | CARACTERISTICAS | Eg (Ev) | RENDIMIENTO | GROSOR ABSORCIÓN |
| ORGANICAS (POLIMEROS) | Estructuras basadas en polímeros conjugados, sobre cuyas cadenas al producirse una excitación por fotones se formarán un transportador de carga conocido como excitón, el cual tiene que difundirse a la interfase, disociarse en cargas libres y finalmente con ayuda de los electrodos se produce el transporte y la extracción. | 1,9 | 18,2% | 100-200 nm |
| SENSIBILIZADAS CON TINTES | Basan su funcionamiento en una capa TiO ₂ (Capa mesoporosa) la cual se le agrega un tinte sensibilizador, ambos se encuentran sumergidos en un electrolito en medio de los contactos de TCO. | | 13% | |
| PEROVSKITAS | El material es estimulado para formar el excitón siendo necesario agregar capas adicionales que faciliten la separación de los electrones huecos y serán recogidos por los contactos. | 1.0 | 25,5% | 400 nm |

Nota. Resumen de las características de diferentes materiales de las celdas solares orgánicas.

Capítulo 4. Demanda de energía eléctrica.

El consumo de energía eléctrica en el mundo tiene un valor de 1918778 KTOE equivalentes a 22300 TW (Cálculos propios Anexo 1) donde el mayor consumo lo representa el sector industrial, seguido por el residencial como lo muestra la figura 13.

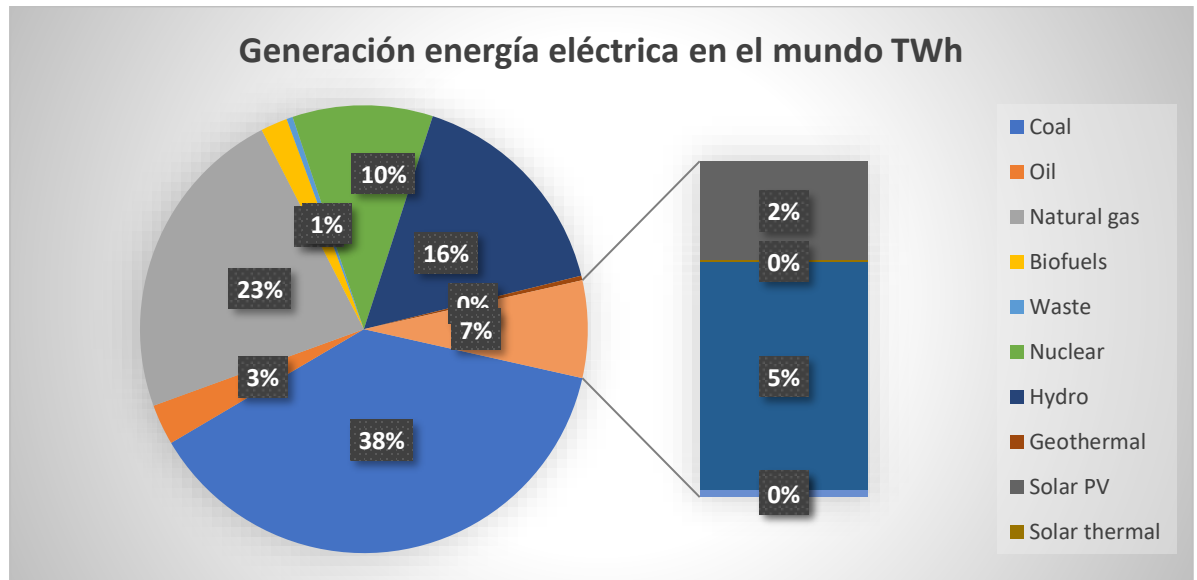
Figura 13. Consumo energía eléctrica en el mundo TWh.



Nota. Relación consumo energético por rubro sector económico en el mundo. (IEA, 2021a)

En cuanto a la producción de energía eléctrica en el mundo, su generación está encabezado por el Carbón con un 36%, seguido por las Hidroeléctricas con un 16% como lo muestra la figura 14.

Figura 14. Generación energía eléctrica en el mundo TWh.

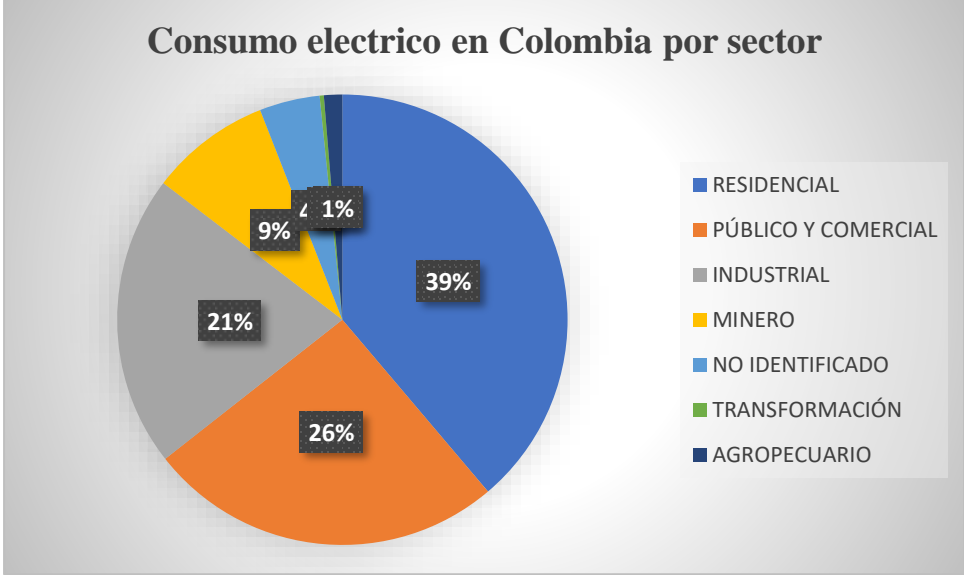


Nota. Relación de generación eléctrica por fuente en el mundo. (IEA, 2021a, 2021b)

El sistema eléctrico nacional se compone por el SIN que se formó en los años setenta por el gobierno nacional que conectó e integró todos los sistemas de generación eléctricos nacionales para garantizar la prestación del servicio, está compuesto por todas las líneas de transmisión y las subestaciones y tiene una capacidad de generación de 17326 MW con una demanda de 10700 MW; en el 2018 generó 68944 GWh de energía y en el 2019 su producción ascendió a 70115 GWh. Lo forman 209 plantas de generación entre las que se encuentran Hidráulicas, Térmicas, Eólicas, Solares, cogeneradores y autogeneradores y más de 30 empresas entre las que se encuentran generación, transmisión y distribución y cuenta aproximadamente con 26333 Km de redes de energía que conforman el sistema de transmisión nacional STN que opera a más de 220 KV y el sistema de transmisión regional STR que opera entre 110 KV y 120 KV. Es de tener en cuenta que el SIN garantiza el abastecimiento de la demanda de las zonas conectadas, todas las plantas generadoras de cualquier clase entregarán la energía producida al SIN, por lo tanto, no

abastecerán la zona donde se encuentren ubicada, ya que esta ira directamente al SIN (CELSIA, 2021a). El resumen del consumo eléctrico nacional se encuentra en la figura 15.

Figura 15. Consumo eléctrico en Colombia por sector



Nota. Fuente: Relación del consumo de energía eléctrica en Colombia por sector económico.

(UPME, 2021)

Capítulo 5. El estado de las tecnologías fotovoltaicas en el mundo.

El silicio (Si) a la fecha aún se mantiene como el protagonista en la generación de energía fotovoltaica mundial, este material implica disponibilidad constante, estabilidad y una vida útil de los módulos de hasta 20 años; sin embargo, este material presenta barreras técnicas que pueden ser superadas con otro tipo de tecnologías, estas últimas han recibido diferentes incentivos; la más reciente ocurrió en el 2004, generada como consecuencia de la escasez de Si que se generó, por la ruptura de la barrera de producción de 1 GW en la energía fotovoltaica, ocasionando una escasez del material, a consecuencia que la demanda aumentó pero la producción del material se mantuvo constante, lo que generó una necesidad para la investigación y desarrollo de otras tecnologías diferentes (Jäger-Waldau, 2006), a pesar de esto las celdas de Si se encuentran desarrollando mejores características e innovaciones sobre el material para mejorar su rendimiento en los módulos, tales como:

1. Sistemas monocristalinos: de acuerdo con la solar Power Europe (Get. Invest, 2019), la producción de las celdas policristalinas irá desapareciendo, dejando únicamente los materiales monocristalinos.
2. Obleas más grandes: Los diseños de las células fotovoltaicas serán más grandes para ocupar mayor espacio en el panel y mejorar su rendimiento.
3. PERC Pasivación de los contactos: Donde por medio de esquemas se hace una pasivación de los contactos traseros de la celda aumentando la pasivación el 1%.
4. Altas eficiencias por heterounión: La unión de diferentes materiales para lograr un mayor rendimiento.
5. Celdas Tándem: En esta estructura se apilan diferentes materiales para lograr un mayor rango de absorción del espectro solar, una de estas celdas es la celda de c-Si/Perovskita.

6. Celdas Bifaciales: Producción por ambas caras de las celdas, el cual se puede lograr a partir de un PERC.
7. Paneles de 500W: El desarrollo de paneles con una potencia de 500W

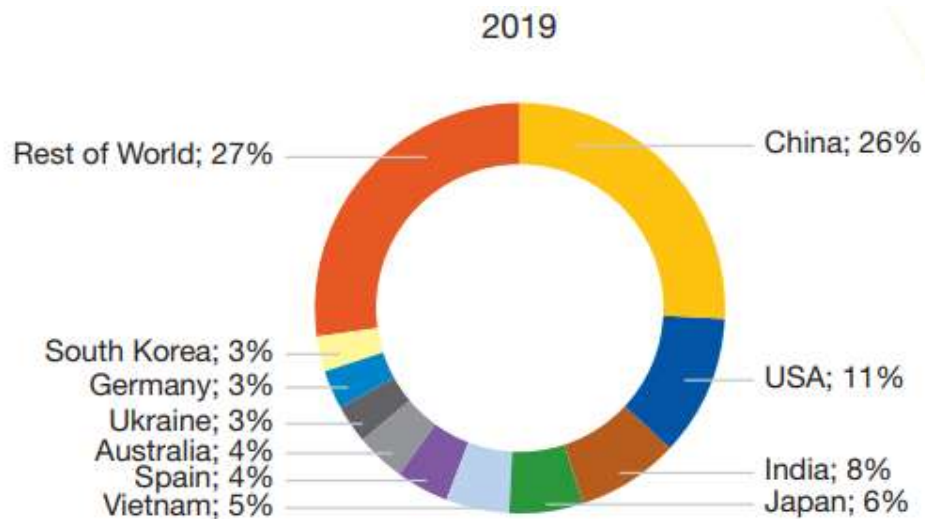
Con el acuerdo de París firmado en el 2015 las energías fotovoltaicas cumplen todas las características para ser una herramienta para cumplir el objetivo de disminuir las emisiones de CO₂, en este marco países como China han incluido en sus planes gubernamentales objetivos para la instalación de sistemas fotovoltaicos con programas como Top Runner (Beetz, 2018) y el 13th Five-year plan, que buscan mantener el incentivo del crecimiento del mercado energético en el país y cumplir con las metas de disminuir las emisiones de CO₂ estipuladas en dicho acuerdo, logrando un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero; China tiene una trayectoria en inversión para el desarrollo de la energía fotovoltaica con datos desde 1996 en los cuales los programas fueron enfocados en modificación de la estructura eléctrica e incluyeron incentivos gubernamentales, apoyo a la red, supervisión de las operaciones, soporte técnico y financiero, con este empuje China también ha venido desarrollando la confianza para que los productores energéticos piensen en una transición a energías limpias; y a consecuencia del desplome del valor del petróleo entre los meses de junio y agosto del 2020, se desarrollaron materiales fotovoltaicos a base de capas orgánicas de no fullerenos, que lograron el rendimiento de 9,5%, en un sustrato de 20 cm x 30 cm demostrando un alto rendimiento y perfilándolo como un candidato para la producción a gran escala (BCN, 2020).

En el nuevo siglo la tecnología solar fotovoltaica ha presentado un crecimiento constante en el mundo, en la última década la tasa de crecimiento superó el 35%, con una capacidad acumulada de 591 GW en el 2019 (Wilson et al., 2020); en ese mismo año se vio un aumento del 13% en el mercado energético internacional instalando 116,9 GW solares en total, tomando de

referencia la tasa de 113 GW solares del 2018, sobre este mercado países como China y Estados Unidos demuestran el liderazgo en instalaciones solares (Get. Invest, 2019), en la figura 16 se puede observar la distribución del mercado energético fotovoltaico mundial por países.

A pesar de este panorama muchos de los países muestran un estancamiento a consecuencia de sus políticas internas, y el despliegue de la producción de energía fotovoltaica PV no se logrará si no se cuenta con el apoyo gubernamental que estimulen su incorporación en el mercado.

Figura 16. Participación en el mercado energético solar por países, 10 principales mercados.



Nota. Identificación de los 10 principales mercados mundiales y su participación en el mercado energético solar:

(Get. Invest, 2019)

Gracias al desarrollo tecnológico el mercado energético solar fotovoltaico mundial ha ido incluyéndose en las agendas de los mercados energéticos públicos y privados; tal es el caso de la tecnología conocida como Building integrated photovoltaic BIPV, sistemas que se pueden adaptar a pequeña escala, distribuidos y automatizados, siendo una ruta fácil para convertirse en

un auto generador. El crecimiento tecnológico aumentado la confianza en la energía PV; países potencias dirigen sus ojos a los mercados emergentes buscando zonas con índices de altas irradiaciones y por medio de programas dirigidos al apoyo de proyectos productores de energía PV, ayudan a que estas zonas generen energía limpia, este es el caso del África Subsahariana una zona que tiene índices de irradiación hasta de 2000 KWh/p y que ha recibido apoyos internacionales para la implementación de sistemas PV (Get. Invest, 2019).

En el 2019 China tenía una capacidad instalada nacional de 205 GW producidos por sistemas PV y un despliegue anual de 30 GWdc, donde la participación en la producción de las celdas a base de Celdas PERC de Silicio monocristalino representan una participación cercana de 37,9 GW, el Silicio policristalino + Celdas PERC representan 17,2 GW y las celdas HIT domesticas representan el 1GW. El mercado fotovoltaico chino empezó a presentar una ventaja frente al mercado mundial gracias a que las grandes potencias trasladaron sus puntos de fabrica a esta zona convirtiéndolo en el principal productor mundial y con las políticas de apoyo gubernamental hicieron este gobierno mucho más fuerte (Yao & Cai, 2019). Sin embargo, en medio de este escenario y del gran trabajo para lograr la paridad de red con las fuentes convencionales, el mercado fotovoltaico ha presentado ciertas trabas el último se dio con la normativa gubernamental 531 que pretendía regular la producción de energía por sistemas fotovoltaicos.

La gran capacidad de producción de China se debe también a su gran potencial de irradiación con un valor entre 5486,82 MJ/m² a 5776,70 MJ/m² en ciertas zonas del país. (Zhang et al., 2020). Sin embargo, las zonas con mayores potenciales para la producción de energía fotovoltaica se encuentran al oeste y el norte del país, pero las zonas con mayor demanda se encuentran en el sur y en el oriente del país, es por esta razón que el cambio a las energías fotovoltaicas se generó directamente sobre sistemas a gran escala, la participación que tiene la

generación distribuida es muy pequeña y los bancos suelen dirigir la atención a los productores a larga escala ofreciendo tasas de interés muy altas para los generadores de energía distribuida (Zhang et al., 2015).

A finales del 2019 Estados Unidos se convirtió en el segundo país con mayor generación de energía fotovoltaica a nivel mundial con una capacidad instalada de 13 GW_{DC}; el mercado fotovoltaicos estadounidense tiene una gran participación en el sector residencial esto se debe a que los precios de estos sistemas han disminuido, generando 10464 GWh en el 2016 (Er et al., 2019), el mercado energético fotovoltaico Estadounidense también se basa en las celdas a base de Si y el avance de las energías fotovoltaicas se debe también al lanzamiento de varios incentivos estatales que apoyan la generación de energía fotovoltaica, donde 30 estados han adoptado estándares de portafolios renovables, implicando que las compañías de servicios públicos adquieran el certificado de energías renovables (Toroghi & Oliver, 2019), también se utilizan mecanismos como las tarifas garantizadas las cuales impactan directamente en la tasa de retorno de los proyectos, a pesar de esto la energía fotovoltaica todavía no representa una competencia directa para el fuentes de combustible convencionales.

India se posiciona como el tercer país con mayor capacidad acumulada globalmente produciendo 19,2 GW_{ac}, en el despliegue anual representó 10 GW_{dc}, donde el gobierno indio se inclina hacia la producción en grandes parques solares, lo que ha generado inconvenientes para encontrar el terreno para estas zonas. En términos generales el mercado asiático es el que mayor crecimiento en despliegue de las energías fotovoltaicas ha representado en los últimos años.

El estado de las tecnologías fotovoltaicas en Colombia.

El país está gestando desde hace varios años la transición a las energías renovables, como lo muestra el informe de gestión del 2018 de la UPME que concluía que los departamentos con mayor potencial para la generación de energía a partir de fuentes no convencionales de energía renovables FNCER es el Cesar, la Guajira y el Magdalena, a esa fecha la producción de la energía a partir de FNCER representaba menos del 1%; el crecimiento de la capacidad solar se incluye y se presentaba junto con la energía eólica cuyos índices indicativos de expansión de generación tenían un crecimiento del 18% en la matriz energética nacional con una capacidad de generación de 4349 MW, donde la confianza solar está en 1213 MW, mostrando que ya se tenía la suficiente confianza sobre esta tecnología y se confirmó en octubre del 2019 cuando se realizó en el país la primera subasta de fuentes no convencionales de energía renovables FNCER, en el cual el gobierno adjudicó 8 proyectos con una capacidad de 1298 MW entre los cuales se encuentran tres proyectos solares (UPME, 2019).

Se puede ver el crecimiento de la capacidad fotovoltaica en el país en el informe de integración de las energías renovables, el cual indica que el país contaba con una capacidad instalada en 2010 de 9 MW pertenecientes a sistemas privados, aplicaciones profesionales y zonas no interconectadas (UPME, 2015a) la capacidad ha aumentado a 180 MW representando el 1.5% de la matriz energética, y para el 2022 el gobierno nacional tiene la meta de alcanzar los 2500 MW representando el 10% (Minergia, 2021). Los proyectos que mayor representación tienen en la capacidad de generación se muestran en la tabla 7.

Tabla 9. Proyectos fotovoltaicos a gran escala con mayor representación en Colombia.

PROYECTOS FOTOVOLTAICOS A GRAN ESCALA EN COLOMBIA

| Nombre | Capacidad | Departamento | Área | Paneles | Fecha inauguración | Ejecutor |
|--------------------------------|-----------|--------------|---------------|---------------|--------------------|-------------------------------|
| Parque solar el Paso | 86,2 MW | CESAR | 210 Hectáreas | 250.000 | 5/04/2019 | ENEL GREEN POWER |
| Bosques de los llanos i | 20 MW | META | No disponible | No disponible | 18/10/2019 | TRINA SOLAR/MATRIX RENEWABLES |
| Parque solar Castilla | 21MW | META | 18 Hectáreas | 54.500 | 18/10/2019 | AES |

Nota. Relación de los proyectos más significativos a gran escala en Colombia. (El Tiempo, 2019); (La República, 2021); (Minergia, 2021)

En el informe de registro de proyectos de generación de la unidad de planeación minero energética se encuentran a la fecha inscritos 196 proyectos solares vigentes con una capacidad de generación de 6657 MW a lo largo del territorio nacional, los cuales serán conectados al SIN, a la fecha de estos 140 se encuentran en la fase 1, 52 en la fase 2 y solo 4 en la fase 3 y donde el 30% corresponden a proyectos con una capacidad entre 0-1 MW y el 32 % entre 1-10 MW representando la mayor proporción en la tabla 8 se podrá observar la clasificación completa de la capacidad de los proyectos, es importante tener en cuenta que las fases hacen parte del registro de proyectos, donde la fase 1 indica la prefactibilidad del proyecto, la fase 2 la de factibilidad del proyecto y la fase 3 al desarrollo y ejecución del proyecto, teniendo en cuenta esto solo cuatro proyectos se encuentran en la última etapa a la fecha. La UPME también indica en este informe que se han preinscrito 888 proyectos a la fecha, a pesar de que solo se aprobaron 196 indica la confianza que se está posicionando en el rubro para plantear la producción a base de esta tecnología pasando de 10 registros en enero del 2019 a 202 en octubre del 2020 (U. A. m. E. UPME, 2021).

Tabla 10. Informe de registros de proyectos de generación: Proyectos vigentes.

| ESTADO | 0-1 MW | 1-10 MW | 10-20 MW | 20-50 MW | 50-100 MW | >100 MW | TOTAL |
|---------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------------|-------------------|--------------|
| FASE 1 | 58 | 38 | 14 | 8 | 15 | 7 | 140 |
| FASE 2 | 1 | 23 | 9 | 2 | 8 | 9 | 52 |
| FASE 3 | 0 | 2 | 1 | 1 | | 0 | 4 |
| TOTAL | 59 | 63 | 24 | 11 | 23 | 16 | 196 |

Nota. Relación de los registros de los proyectos clasificados por fase y capacidad, a corte del presente año reportados en la página oficial de la UPME: (UPME, 2021)

En el plan de expansión de referencia generación – transmisión 2016-2030 pronosticaba que las energías fotovoltaicas iban a tener un crecimiento en las grandes ciudades por medio de sistemas distribuidos, abriendo las puertas a los sistemas fotovoltaicos residenciales (UPME, 2016a); sin embargo, en estos proyectos se debe tener en cuenta que esto acarrea costos adicionales para la modificación de la estructura de la red eléctrica, los cuales deberán ser asumidos por los usuarios, a pesar de esto en la ciudad de Bogotá la población objetivo tendrá la capacidad económica para suplir cualquier necesidad siempre y cuando se demuestre que el proyecto es viable en el ámbito técnico y económico; en el informe de integración de las energías renovables se concluye que la única forma de que un proyecto fotovoltaico sea rentable es teniendo en cuenta una medición neta del consumo por medio de contadores bidireccionales, de tal forma que se puedan llegar acuerdos con el agente productor (UPME, 2015a) y adicional utilizar todos los incentivos que otorga la ley 1715 que incluye beneficios arancelarios, al impuesto de valor agregado IVA y al impuesto de renta (Ley 1715, 2014).

Revisando el estado de la autogeneración para hogares y pymes, en el mercado se encuentran diferentes empresas que ofrecen servicios de instalación, mantenimiento, conexión al SIN y financiamiento del proyecto como lo muestra la tabla 9. En el país existen 3 formas para que una pyme o una persona natural adquiera un sistema solar; por medio de leasing sostenibles con

entidades bancarias que facilitan hasta 30000 millones para el caso de construcción sostenible con un plazo de hasta 10 años (S.A., 2018), la compra directa o los contratos Power Purchase Agreement – PPA estos últimos hacen referencia a un contrato en el cual un inversionista compra los activos y vende la energía al dueño del inmueble que accedió a la instalación (Erco Energy, 2021).

Tabla 11. Relación de proveedores de sistemas fotovoltaicos a pequeña escala.

| Empresas | Servicios | Tecnología | Capacidad instalada |
|--------------------|--|----------------------------------|----------------------------|
| EPM | Instalación del sistema | CELDAS SOLARES DE SILICIO | |
| | Trámite de registro del autogenerador ante el operador de red | | |
| | Financiación con el programa somos grupo EPM | | |
| CELSIA | Instalación del sistema | CELDAS SOLARES DE SILICIO | 23 MWp |
| | Soporte y mantenimiento del Sistema | | |
| | Trámite de registro del autogenerador ante el operador de red | | |
| | Modelo económico de financiación PPA | | |
| SUNCOLOMBIA | Instalación del sistema | CELDAS SOLARES DE SILICIO | 5020 KWp |
| | Soporte y mantenimiento del Sistema | | |
| | Trámite de registro del auto generador ante el operador de red | | |
| | Modelo económico de financiación PPA | | |

Nota. Identificación de los proveedores a pequeña escala actuales del mercado que proporcionan servicios y suministran sistemas fotovoltaicos. (CELSIA, 2016; Erco Energy, 2021; SUNCOLOMBIA, 2021)

El gobierno ha promovido la diversificación de la canasta energética nacional por medio de sistemas fotovoltaicos a gran escala, los ejecutores de estos proyectos ganaron estas cuentas por que ofrecían condiciones que garantizaban el flujo de trabajo constante; como es el caso del parque solar Bosques de los llanos I desarrollado por Trina Solar, que propuso en su modelo de negocios un método de financiación en el cual utilizo alianzas público privadas de la mano de la financiera nacional y el banco Davivienda con una modalidad de Project finance indicando que

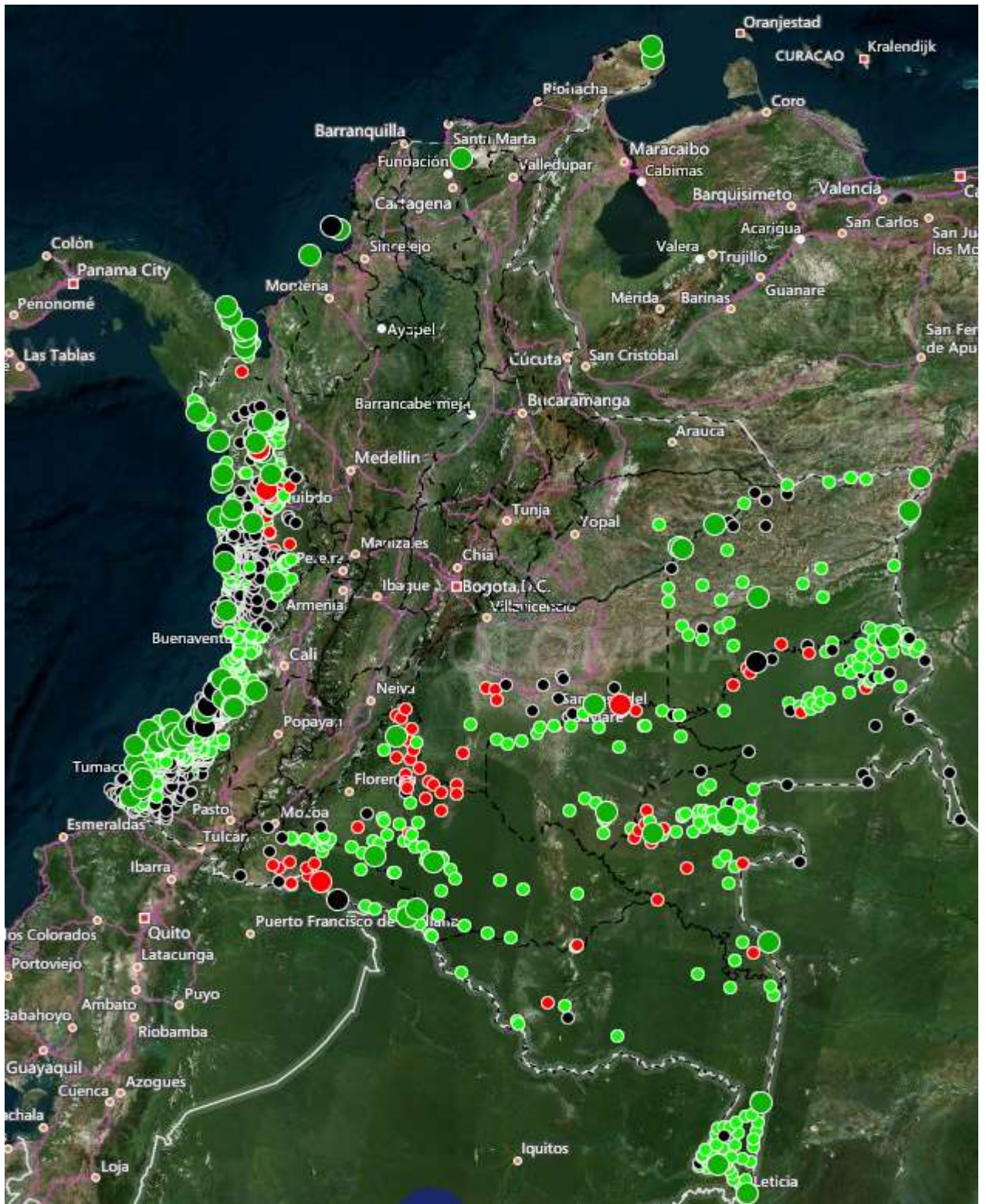
su financiación se da sobre los flujos de trabajo y no sobre el balance de la compañía ejecutora, este método le permitió adjudicarse 3 proyectos energéticos a base de tecnologías solares que producirán en los próximos 2 años 450 MW de energía limpia (Semana, 2020).

Para la producción descentralizada solo se tiene los incentivos de la ley 1745 y su ejecución se da por algunas empresas privadas, las cuales también se encargan de proveer financiación a los interesados, sin embargo, es de tener en cuenta que es una opción que aún no es una alternativa en general, solo ciertos grupos de personas con mayor poder adquisitivo pueden acceder a ella, adicional el déficit cuantitativo de vivienda aunque ha presentado una mejoría en los últimos años, en 2018 esta cifra aún correspondía 558492 unidades (Arredondo, 2019), indicando que parte de la población no tiene un lugar propio sobre el cual podría realizar una inversión y finalmente debido a la gran cantidad de personas viviendo en propiedades horizontales se hace más común que las decisiones sean colectivas complicando el paso para la elección de una fuente de foto generación descentralizada, creando la necesidad de espacio para la instalación de los paneles fotovoltaicos una restricción, ya que un sistema con una potencia de 6,7 KW con la capacidad de suplir 453 KW necesitará una área con una extensión de 51 m^2 (Rodríguez Manrique et al., 2015). A pesar de que el espacio representa una limitación es de tener en cuenta que los sistemas tipo BIPV pueden ofrecer alternativas poco invasivas en las fachadas de las estructuras que dan solución a este inconveniente.

Otro de los problemas a nivel energético en el país son las zonas no interconectadas ZNI al SIN representan el 52% del territorio nacional afectando a 1900000 de personas, conformada por 17 departamentos y 97 municipios que incluye cuatro capitales departamentales Amazonas, Vichada, Guainía, Vaupés y San Andrés y providencia departamento Insular, zonas que se caracterizan por su baja densidad poblacional cuyas necesidades insatisfechas alcanzan el 77% y

donde los valores de la electricidad alcanzan un precio promedio de 1248 KWh, en este contexto la energía fotovoltaica es la mejor alternativa para proporcionar energía a el alcance de estas zonas gracias a sus sistemas autónomos e independientes. Para prestar el servicio de sistemas fotovoltaicos en el país solo se tienen 110 prestadores del servicio que tienen un alcance de 213987 personas (SUPERSERVICIOS, 2017). El instituto de promoción y planeación de soluciones energéticas para las zonas no interconectadas IPSE adscrita al ministerio de minas y energía es la encargada de ofrecer soluciones energéticas a las zonas no interconectadas, por lo tanto, les hace seguimiento a estas zonas por medio de herramientas como el sistema de información geográfico del IPSE: SIGIPSE, en el cual se muestran todas las ZNI nacionales y el servicio que se está prestando en ellas. Al comparar estas zonas con el mapa de radiación solar, se encuentra que estas zonas tienen un rango de radiación diaria de 3,5 KWh a 5,5 KWh.

Figura 17. Zonas no interconectadas nacionales



Nota. Identificación de las ZNI los puntos verdes representan las zonas no interconectadas al SIN (SIGIPSE, 2021).

Ciudades como San Andrés en el 2014 tuvieron un consumo de 189156 MWh que fueron suministrados con generadores Diesel a pesar del potencial de irradiación en la zona (Rosso-Ceron et al., 2019). Es de tener en cuenta que después de las 6:00 pm la demanda de energía eléctrica se hace latente en cualquier ZNI y muchas de estas utilizan plantas de ACPM o gasolina y considerando la baja demanda del consumo eléctrico por vivienda o por comunidad, un sistema fotovoltaico puede suplir la demanda completa de estas zonas (Arias & Villamil, 2020).

En la sabana de Bogotá existen varias propuestas para la implementación de sistemas fotovoltaicos, en las cuales dichos sistemas pueden ser aislados o interconectados, con la capacidad de suplir la totalidad de la demanda o parte de ella, la mayor proporción de costos se ven representados por los equipos necesarios para el sistema y *el periodo de retorno de inversión* PRI, que en el 2017 excedía el periodo de operación haciéndolo económicamente inviable (Salamanca-Ávila, 2017). Entre las demandas necesarias para sistemas fotovoltaicos convencionales a base de paneles de Si-mc o Si-pc se encuentra una extensa área para lograr una captación rentable, sin embargo, en el país aún no se tiene suficiente confianza en los módulos de película delgada u orgánicas, cuyos materiales no son tóxicos y su costo es más reducido.

Marco normativo de aplicación para la energía fotovoltaica en el país.

El marco normativo que aplica para el desarrollo de las energías fotovoltaicas en el país se ha incorporado directamente sobre la temática de energías no convencionales de carácter renovable FNCER, con este marco se busca la integración en el mercado eléctrico de las FNCER, la participación en las zonas no interconectadas; proponiéndose como medio para la seguridad energética del país y para disminuir los efectos ambientales generados por los productores energéticos convencionales, también tiene como objetivo la inversión, desarrollo e investigación

de las energías limpias, que se han propuesto en el marco del uso racional y eficiente de la energía y la defensa del medio ambiente.

Entre la normativa que permite la orientación hacia la producción a pequeña, gran escala y la generación distribuida, se tiene data desde el artículo 15 de la ley 142 de 1994 donde se estipula que las personas naturales o jurídicas pueden prestar los servicios públicos o producir para ellas mismas. Con la ley 1715 del 2014 se regula el ingreso de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional, estableciendo el marco legal y los instrumentos necesarios para su promoción, buscando dar cumplimiento al compromiso del país en los compromisos adquiridos en marcos internacionales, con la convicción de que las energías renovables son una oportunidad no solo para la seguridad energética sino que también permitirá mantener los precios regulados de este mercado, entre las disposiciones que se toman en el capítulo II de esta ley, corresponde a las disposiciones para la generación de electricidad a base de fuentes no convencionales de energía FNCE y la gestión de la eficiencia de energía, el artículo 8. establece los mecanismos necesarios para la autogeneración a pequeña y gran escala y la producción distribuida, entre los cuales se busca disminuir la producción de energía por medio de Diesel en zonas no interconectadas y se crea del fondo de energías no convencionales y gestión eficiente de la energía – FENOGE. (Ley 1715, 2014), fondo que financia, gestiona y ejecuta planes, programas y proyectos alineados con el propósito de mejorar la eficiencia energética y el uso de fuentes no convencionales en el país (FENOGE, 2021).

Entre las leyes que anteceden a ley 1715 y que pautan el uso eficiente de la energía y el uso de fuentes renovables se tiene la ley 697 del 2001 en el que se establece como asunto de interés social, publico y de conveniencia nacional el uso racional y eficiente de la energía URE, se establece como deber por parte del gobierno la creación de estructura, legal, técnica y financiera

para su cumplimiento y se crea el programa de uso racional y eficiente de la energía y demás formas de energías no convencionales PROURE (697, 2001), el cual lanza plan de acción indicativo 2010-2015 fijando objetivos por cada sector y la ley 1665 del 2013 que genera la aprobación del estatuto de la agencia internacional de energías renovables IRENA en el que se promueve la implantación y el uso generalizado y reforzado de las energías renovables, se hace referencia al potencial energético solar haciendo un recuento de los retos de las fuentes no convencionales de energía - FNCE en Colombia entre los que se encuentra pasar de la etapa de reconocimiento y lograr la incorporación de estas al mercado energético nacional, así como también se plantea el plan energético nacional 2010-2030 (Ley 1665, 2013), cuyos objetivos principales se relación en la tabla 10.

Tabla 12. Resumen objetivos plan energético nacional 2010-2030.

Plan energético nacional 2010-2030

| Objetivo | Descripción |
|--|---|
| Reducir la vulnerabilidad del sector energético | En este se contempla como instrumento para la diversificación energética. |
| Maximizar la contribución del sector energético a las importaciones | Es utilizado como instrumento para fortalecer la investigación. |
| Aprovechar los recursos energéticos de Colombia con criterios de sostenibilidad | Se utiliza como medio el fomento de la innovación tecnológica en el uso de la energía. |
| Armonizar el marco institucional para implementar la política energética nacional | Por medio del establecimiento de una coordinación interinstitucional en relación con el sector energético |

Nota. Relación de los objetivos y la descripción de cada uno de ellos. (Ley 1665, 2013)

La ley 1715 le confirió a la Comisión reguladora de energía y gas CREG la responsabilidad de minimizar y reglamentar los procesos de conexión para los autogenerados y en la resolución 030 del 2018 se establecen las definiciones, los requisitos, las instrucciones y obligaciones de cada autogenerador para conectarse a un sistema de distribución local SDL. Con esta normativa se pretende promover la autogeneración a base de energías renovables por parte de cualquier

persona por medio de incentivos tributarios entre los cuales se encuentra la exención del IVA en la distribución de los equipos que hacen parte de los sistemas, beneficios arancelarios y descuentos en el impuesto de renta. (030, 2018)

Viabilidad de la energía fotovoltaica en el país.

La energía fotovoltaica en Colombia tiene un gran potencial para la generación de electricidad, gracias a su ubicación geográfica cerca al Ecuador le confiere la posibilidad de recibir casi la misma tasa de irradiación a lo largo del año, permitiendo la posibilidad de implementar sistemas de generación distribuida independientes, que fortalezcan y brinden soporte al sistema interconectado nacional SIN, que actualmente sólo representa el 48% de la cobertura de la red eléctrica nacional, dejando por fuera 17 departamentos ubicados a los flancos del territorio nacional, en los cuales se presentan los mayores niveles de irradiación solar (Gomez-Navarro & Ribo-Perez, 2018), la cual puede ser utilizada para la generación.

Sin embargo, para la migración energética a fuentes renovables el país aún tiene grandes restricciones; la primera el SIN tiene unos pocos participantes en la producción energética y agentes operadores en la distribución, se tiene poco conocimiento de las energías renovables y se cuenta con una baja *tasa interna de retorno* actual de los sistemas (que indica la proporción en la cual se recuperan los rendimientos futuros del valor de la inversión hecha); para poder sobrepasar estos límites el gobierno nacional ha lanzado políticas que se han venido regulando en los últimos 6 años, que principalmente ofrecen incentivos en impuestos descontables, generando que varias empresas pequeñas privadas que inician el camino para ofrecer sistemas energéticos a base de energía fotovoltaica a lo largo del territorio nacional (Lopez et al., 2020). Por otra parte, también se han desarrollado proyectos privados a gran escala, que se ejecutaron por grandes compañías

como Celsia S.A. desde el 2017; y durante el 2020 se generó la apertura de grandes parques solares de la mano del gobierno nacional.

En el panorama actual es necesario orientar las energías fotovoltaicas hacia el sector residencial, ya que su consumo energético a nivel nacional representa más del 40%. Así, para evaluar la viabilidad de la implementación de los paneles fotovoltaicas en áreas residenciales, es necesario tener en cuenta el sistema energético nacional, en el cual los precios se generan por estratos del 1 al 6 de acuerdo con la capacidad adquisitiva de los usuarios; los estratos 5 y 6 subsidian parte de los costos de los estratos más bajos. De esta forma, los estratos más altos serían los que podrían adquirir un sistema fotovoltaico y convertirse en generadores logrando la producción descentralizada, esta situación puede generar un desbalance en el sector energético actual ya que indicaría la pérdida de los subsidios que le ofrecen a los estratos más bajos.

A pesar de que hay un largo camino por recorrer el país fue reconocido por el foro económico mundial en el 2019 por su potencial y esfuerzos hacia la transición energética. Además, Colombia tiene la suficiente seguridad energética para dar este paso, con el compromiso del gobierno nacional y mejores accesos a las inversiones (World Economy forum, 2020), se logrará transformar nuestra matriz energética, pasando de un sistema basado en combustibles fósiles, hacia uno más diverso, apoyado en fuentes más limpias y sostenibles (Sierra et al., 2020).

Conclusiones

El mercado de la energía solar fotovoltaica está dominado principalmente por las células de Silicio cristalino, gracias a la estabilidad y abundancia del material en el planeta. Las celdas solares a base de Silicio monocristalino demuestran un mejor rendimiento que el Silicio policristalino; con una diferencia del rendimiento del 5%, donde las primeras presentan un rendimiento del 25% y las segundas del 20%, esta situación se debe al mejoramiento en los procesos de producción del Silicio monocristalino.

También, se han desarrollado celdas con materiales en películas muy delgadas, los cuales entre sus propiedades semiconductoras, presentan bandas prohibidas (band gap) directas, y gracias a los métodos de deposición, pueden ser incorporados casi sobre cualquier tipo de sustrato, con menores grosores y con procesos de producción más baratos; en este grupo se encuentran las celdas de Silicio amorfo a-Si, CdT y las celdas CIGS/CIG, Este tipo de celdas ofrecen la flexibilidad que permite cubrir los espacios en ventanales y fachadas de edificios, posicionándola como una alternativa para proporcionar energía a las grandes estructuras en las urbes.

Las celdas a base de a-Si tienen un rendimiento del 14%, las celdas de CdTe presentan un mejor rendimiento con una eficiencia del 18,6%; sin embargo, la toxicidad del Cadmio y la escases del Telurio representan barreras para su difusión a gran escala; no obstante, empresas productoras como First solar tienen una política de sostenibilidad que busca disminuir el impacto ambiental del ciclo de vida de sus productos, ofreciendo plantas de reciclaje y medios de recepción de los paneles, alcanzando un índice de reciclaje superior al 90%. (First Solar, 2021d). Las celdas a bases de calcopiritas tienen su representación comercial en los materiales CIS, demuestran rendimientos similares a celdas de Silicio monocristalino; con la

ventaja de que en condiciones de altas temperaturas o con la incidencia de sombras, mantienen su rendimiento.

Las celdas a base de SnS es una tecnología en desarrollo, sin embargo, son materiales que tienen un buen enlace con las celdas de CdTe, así que se utilizan como componentes de su estructura.

Las celdas pertenecientes a los grupos III y V representadas principalmente por el AsGa presentan excelentes rendimientos, sin embargo, debido a la toxicidad de sus materiales, estas son principalmente limitadas a aplicaciones espaciales.

Finalmente, la tercera generación de celdas solares catalogadas como “emergentes”, conformadas por las celdas Orgánicas a base de polímeros semiconductores, las cuales presentan eficiencias del 18%, las celdas sensibilizadas por colorantes (tipo ftalocianinas), con rendimientos del 13%; y las celdas a base de Perovskitas, que alcanzan rendimientos del 25%. Las celdas basadas en Perovskita son las que mejor rendimiento presentan en esta generación, y alcanzan rendimientos superiores al mc-Si (silicio monocristalino), y a las celdas CIGS; sin embargo, a pesar de los beneficios en eficiencia y costos de las celdas orgánicas a base de polímeros, aún presentan limitaciones en términos de estabilidad, principalmente por sus propiedades higroscópicas que las hace sensibles a las condiciones ambientales. En cuanto a las celdas de Perovskitas y las sensibilizadas con colorantes, entre las mayores limitaciones que presentan se destaca el hecho de que entre sus componentes se encuentran materiales poco abundantes en la corteza terrestre, lo que genera una restricción para la producción a gran escala.

Con el desarrollo en diferentes materiales se le ha conferido a la tecnología fotovoltaica

mejor relación costo/eficiencia y mayor flexibilidad de adaptación; proporcionando la facilidad de estructurar proyectos a gran escala, mediana y pequeña, adaptables a cada entorno. Además, se está posicionando como alternativa para la generación distribuida de electricidad en el mundo, ofreciendo la posibilidad de disminuir las pérdidas de energía por los largos recorridos a través de las líneas nacionales de transmisión, y los riesgos ambientales y sociales asociados a la implementación de grandes proyectos hidroeléctricos y/o termoeléctricos, constituyéndose así, en una gran alternativa para la generación de energía en las zonas no interconectadas ZNI, permitiendo aprovechar los altos niveles de radiación solar que se presentan muchas de estas regiones, que principalmente corresponde a las zonas costeras y los flancos orientales y occidentales del país.

El país ya ha tomado varias iniciativas para la producción de energía eléctrica a partir de energía solar fotovoltaica, y proyecta un crecimiento considerable hacia las energías renovables; sin embargo, a pesar de todas las proyecciones e incentivos, el camino hacia la descentralización de la energía en Colombia tiene un largo proceso por completar, es necesario promover políticas más fuertes para incentivar la migración del sector residencial y comercial a la autogeneración, por lo menos a fin de complementar y fortalecer la red eléctrica de las ciudades, especialmente ahora que la integración de vehículos eléctricos en el país representará una fuerte recarga sobre el sistema eléctrico a nivel urbano.

Finalmente, es de recalcar el reporte de la agencia de energías renovables (IRENA) en las estadísticas acerca de la capacidad de la energía renovable en el 2020m donde se muestra que la energía solar fotovoltaica alcanzo una capacidad de generación en el mundo de 580159 MW, siguiendo a las fuentes productoras como las hidroeléctricas y eólicas, ubicándola entre las fuentes alternativas más importantes para la generación eléctrica. Teniendo en cuenta este

panorama mundial se vislumbra como esta tecnología va ganando fuerza para convertirse en una de las formas de generación más importantes en la producción energética limpia (IRENA, 2020).

Anexo 1. Conversión de unidades KTOE a TWh del consumo eléctrico mundial por sector.

Tabla 13. Consumo eléctrico final por sector en el mundo.

| | | | | | | |
|--|----------------|-------------|-----------------------|------------|--------------|------------|
| INDUSTRIA | 804964 | kToe | 9355470471001 | kWh | 9355 | TWh |
| RESIDENCIAL | 516595 | kToe | 6003981.877409 | kWh | 6004 | TWh |
| COMERCIAL Y SERVICIOS PUBLICOS | 412627 | kToe | 4795642679719 | kWh | 4796 | TWh |
| TRANSPORTE | 33525 | kToe | 389634999255 | kWh | 390 | TWh |
| PEZCA | 665 | kToe | 7728777763 | kWh | 8 | TWh |
| AGRICULTURA | 58873 | kToe | 684235087581 | kWh | 684 | TWh |
| SERVICIOS NO ESPECIFICADOS | 91530 | kToe | 1063781997966 | kWh | 1064 | TWh |
| TOTAL ENERGÍA ELECTRICA CONSUMIDA | 1918779 | kToe | 22300475890694 | kWh | 22300 | TWh |

Nota. Conversión de la información suministrada en la página de la NREL de KTOE a TWh, datos utilizados para elaborar el gráfico

Bibliografía

- AIST. (2021). *Inicio de una investigación conjunta a gran escala sobre el desarrollo de la tecnología de fabricación de obleas de SiC para la electrónica de potencia de próxima generación -Desarrollo de tecnología de crecimiento de cristales y producción en masa de obleas que logra alta calidad y bajo costo.*
<https://translate.google.com/translate?hl=es&sl=ja&u=https://www.aist.go.jp/&prev=search&pto=aue>
- Arias, C., & Villamil, B. (2020). Energía limpia para iluminación en los hogares de las zonas no interconectadas. <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/811/816>
- Arredondo. (2019). *Evaluación de la política pública de vivienda social en Colombia y su impacto en el último quinquenio (2014-2018)*. Universidad de los Andes]. Bogotá, Colombia.
https://biblioteca.uniandes.edu.co/visor_de_tesis/web/?SessionID=L1Rlc2lzMjAxNjk5LzE5NTY4LnBkZg%3D%3D
- Baltif, C., Despeisse, M., & Haug, F.-J. (2014). Thin film solar cells based on Amorphous and Microcrystalline Silicon. In *Clean Electricity From Photovoltaics (2nd Edition)* (2 ed., Vol. 2nd edition). Imperial College Press.
- BCN, B. d. C. N. d. C. (2020). El desarrollo de las energías renovables en China a pesar de la pandemia - Programa Asia Pacifico [Text].
<https://doi.org/http://www.bcn.cl/observatorio/asiapacifico/noticias/desarrollo-energia-renovable-china-coronavirus>
- Beetz, B. (2018). 14 Tendencias fotovoltaicas para 2019.
- Belyakov, N. (2019). Chapter Seventeen - Solar energy. In N. Belyakov (Ed.), *Sustainable Power Generation* (pp. 417-438). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817012-0.00031-1>
- Bevilacqua, P., Morabito, A., Bruno, R., Ferraro, V., & Arcuri, N. (2020). Seasonal performances of photovoltaic cooling systems in different weather conditions [Article]. *Journal of Cleaner Production*, 272, 12, Article 122459.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122459>
- CELSIA. (2016). *Energía Solar Empresas*. <https://www.celsia.com/es/energia-solar/>
- CELSIA. (2021a). *Documento de trabajo sobre el Sistema Interconectado Nacional, SIN*.
<https://www.celsia.com/wp-content/uploads/2020/09/Documento-de-trabajo-sobre-el-Sistema-Interconectado-Nacional.pdf>
- CELSIA. (2021b). Empezó a generar energía Celsia Solar Yumbo, primera granja fotovoltaica de Colombia - Celsia.
- Credgington, D. (2014). Thin film solar cells based on Amorphous and Microcrystalline Silicon. In C. O. Photovoltaics (Ed.), *Clean Electricity From Photovoltaics (2nd Edition)* (2 ed., Vol. 2nd edition). Imperial College Press.
- DANE. (2018). *¿Dónde estamos?* Departamento Nacional de estadística.
<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018/donde-estamos>
- Edx. (2021). *1.4 History of Solar Energy | Week 1: Introduction to Solar Energy | Solar Energy / edX*. <https://learning.edx.org/course/course-v1:DelftX+ET3034x+2T2020/block-v1:DelftX+ET3034x+2T2020+type@sequential+block@0ce9d4a1f6ca47ddb38e5183bbe685e/block->

v1:DelftX+ET3034x+2T2020+type@vertical+block@c6334d86cf7246638d1764874eea13c3

- El Tiempo, C. E. (2019). Inauguran el parque solar más grande de Colombia.
- Er, Z., Chenaf, T., & Demir, C. E. (2019). Short analysis for the growth of solar electricity usage [Article; Proceedings Paper]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(9), 5325-5330. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1859-8>
- Erco Energy, C. (2021). *Sistema interconectado para tu hogar - Erco Energia Colombia*. <https://www.ercoenergia.com.co/energia-solar/sistema-interconectado-para-tu-hogar/>
- FENOGE. (2021). *¿Quiénes somos? ¿Qué es FENOGE?* <https://fenoge.com/quienes-somos/>
- First Solar. (2021a). *First Solar Series 4™ PV Module*. <https://www.firstsolar.com/-/media/First-Solar/Technical-Documents/Series-4-Datasheets/Series-4V3-Module-Datasheet.ashx>
- First Solar. (2021b). *First Solar Series 6™*. <https://www.firstsolar.com/-/media/First-Solar/Technical-Documents/Series-6-Datasheets/Series-6-Datasheet.ashx?la=en>
- First Solar. (2021c). Our Technology.
- First Solar. (2021d). *Sustainability Report 2020*. https://www.firstsolar.com/-/media/First-Solar/Sustainability-Documents/FirstSolar_Sustainability-Report_2020.ashx
- Gemmela, G., Hensena, J., & Kajari-Schrödera, S. B., R. (2019). Detachment yield statistics for kerfless wafering using the porous silicon process. 202.
- Gesser, T., & Bonnet, D. (2014). Clean Electricity From Photovoltaics (2nd Edition). In C. P. C. T. p. devices (Ed.), *Clean Electricity From Photovoltaics (2nd Edition)* (Vol. 2nd edition). Imperial College Press.
- Get. Invest. (2019). *Global Market Outlook for solar power*. https://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2019/07/SolarPower-Europe_Global-Market-Outlook-2019-2023.pdf
- Gomez-Navarro, T., & Ribo-Perez, D. (2018). Assessing the obstacles to the participation of renewable energy sources in the electricity market of Colombia [Review]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 90, 131-141. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.015>
- Grätzel, M., & Durrant, J. (2014). Chapter 9. Dye and perovskite-Sensitized Mesoscopic solar cells. In *Clean Electricity From Photovoltaics (2nd Edition)* (Vol. 2nd edition). Imperial College Press.
- Honsberg, C., & Bowden, S. (2021). Eficiencia Cuántica PV Education. <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/4-operaci%C3%B3n-de-c%C3%A9lulas-solar/eficiencia-cu%C3%A1ntica>
- IDEAM. (2021). *Atlas de radiación solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia*. <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>
- IEA. (2021a). *Data & Statistics - IEA. Energy consumption. Total final consumption (TFC) by sector.* IEA.
- IEA. (2021b). *Data & Statistics - IEA. Energy supply. Total Energy supply (TES)* IEA.
- IEA. (2021c). *Tracking Buildings 2020*. IEA. <https://www.iea.org/policies>
- IRENA. (2020). *RENEWABLE CAPACITY STATISTICS 2020*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2020.pdf
- Jäger-Waldau, A. (2006). European Photovoltaics in world wide comparison. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 352(9), 1922-1927. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2005.10.074>

- La República, E. (2021). Ecopetrol inauguró su parque solar en Castilla la Nueva, departamento del Meta.
- Ley 697 del 2001. Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones., (03 de octubre del 2001).
<https://www.habitatbogota.gov.co/transparencia/normatividad/normatividad/ley-697-2001>
- Ley 1665 del 2013. Por medio de la cual se aprueba el “Estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (Irena)”, hecho en Bonn, Alemania, el 26 de enero de 2009., (16 de julio del 2013). http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1665_2013.html
- Ley 1715 del 2014. Por medio de la cual se regula la integración de las Energías Renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional, (13 de mayo 2014).
https://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf
- Lopez, A. R., Krumm, A., Schattenhofer, L., Burandt, T., Montoya, F. C., Oberlander, N., & Oei, P. Y. (2020). Solar PV generation in Colombia - A qualitative and quantitative approach to analyze the potential of solar energy market [Article]. *Renewable Energy*, 148, 1266-1279. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.066>
- Lopez, J., & Moreno, E. y. G. M. J. (2005). *La naturaleza de la luz: el efecto fotoeléctrico*. <http://museovirtual.csic.es/salas/luz/luz33.htm#>
- Manzanares, J. (2007). *Tecnología de celulas solares de Silicio Cristalino* Escuela de negocios EOI].
- Marti Valls, R. (2016). *Obtención de estructuras Calcopirita (CIGS) y Kesterita (CZTS) como absorbentes para dispositivos fotovoltaicos de capa fina mediante métodos de síntesis de bajo coste* Universidad Jaime I de Castellon]. Castellon, España.
https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/400856/2016_Tesis_Marti%20Valls_Rafael.pdf?sequence=1%20
- Minergía. (2021). *Transición energética: Minergía y Trina Solar inauguran granja solar en el Meta*. <https://www.minenergia.gov.co/en/historico-de-noticias?idNoticia=24241139>
- Murias, D. (2016). *Estudio de Pasivación de Sustratos de c-Si y texturización por plasma para aplicaciones en celdas solares de Heterounión* Instituto Nacional de Astrofísica - INAOE]. Tonantzintla, Puebla.
<https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/11/1/MuriasFiDG.pdf>
- NREL. (2021). Best Research-Cell Efficiency Chart. In.
- Oku, T. (2017). *Solar Cells and Energy Materials* [Book]. De Gruyter.
- ONU, O. d. I. N. U. (1998). Protocolo de Kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático.
- Ramos Terrón, S. (2018). *Fabricación y caracterización de celdas de Perovskita de nueva composición. Fabricación y caracterización de celdas de Perovskita de nueva composición* Universidad de Sevilla].
<https://www.upo.es/cms1/export/sites/upo/investiga/ccs/documentos/TFM-Susana-Ramos-Terron.pdf>
- Rau, U., & Schock, H. (2014). Chapter 6. CuInGaSe₂ and related solar cells. In *Clean Electricity From Photovoltaics (2nd Edition)* (Vol. 2nd edition). Imperial College Press.
- Resolución N.º 030 del 2018 [Comisión de regulación de energía y gas CREG]. Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional, (26 de febrero del 2018).

<http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/83b41035c2c4474f05258243005a1191>

- Rodríguez Manrique, A. K., Cadena Monroy, Á. I., & Aristizábal Cardona, A. J. (2015). Diseño de sistemas de energía solar fotovoltaica para usuarios residenciales en Chía, Cundinamarca. *Revista Mutis*, 5(1), 55-65. <https://doi.org/10.21789/22561498.1019>
- Rosso-Ceron, A. M., Kafarov, V., Latorre-Bayona, G., & Quijano-Hurtado, R. (2019). A novel hybrid approach based on fuzzy multi-criteria decision-making tools for assessing sustainable alternatives of power generation in San Andres Island [Article]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 110, 159-173. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.053>
- S.A., B. (2018). *Leasing Sostenible*. <https://www.grupobancolombia.com/wps/portal/empresas/productos-servicios/leasing/leasing-sostenible>
- Salamanca-Ávila, S. (2017). Propuesta de diseño de un sistema de energía solar fotovoltaica. Caso de aplicación en la ciudad de Bogotá. *Revista científica*, 30, 263-277. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0124-22532017000300263&script=sci_abstract&tlng=es
- Semana. (2005). Historia de las crisis del petróleo.
- Semana. (2020). Un nuevo parque solar comienza su operación en el Meta.
- Sierra, D., Aristizabal, A. J., Hernandez, J. A., & Ospina, D. (2020). Life cycle analysis of a building integrated photovoltaic system operating in Bogota, Colombia [Article; Proceedings Paper]. *Energy Reports*, 6, 10-19. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.10.012>
- SIGIPSE, S. d. i. g. d. I. (2021). *Prestación Servicio*. http://190.216.196.84/ps_cnm/#
- Smets, A., Jäger, K., Olindo, I., Swaaij, R. V., & Zeman, M. (2015). *Solar Energy: The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems* (U. Cambridge, Ed.)
- SOLAR FRONTIER. (2021a). *Performance*. <https://www.solar-frontier.com/eng/technology/Performance/index.html>
- SOLAR FRONTIER. (2021b). *SFK180-S*. https://www.solar-frontier.com/eng/solutions/products/pdf/SAB12-0744_01_Product_Data_Sheet_SFK180-S.PDF
- SOLAR FRONTIER. (2021c). *SFK185-S*. https://www.solar-frontier.com/eng/solutions/products/pdf/SAB12-0745_01_Product_Data_Sheet_SFK185-S.PDF
- Solar, J. (2020a). *Tiger Pro 60HC*. [https://jinkosolar.eu/files/jinko/module/datasheets/en/EU-JKM440-460M-60HL4-\(V\)-F1-EN.pdf](https://jinkosolar.eu/files/jinko/module/datasheets/en/EU-JKM440-460M-60HL4-(V)-F1-EN.pdf)
- Solar, J. (2020b). *Tiger Pro 72HC*. [https://jinkosolar.eu/files/jinko/module/datasheets/en/EU-JKM530-550M-72HL4-\(V\)-F1-EN.pdf](https://jinkosolar.eu/files/jinko/module/datasheets/en/EU-JKM530-550M-72HL4-(V)-F1-EN.pdf)
- Solar, J. (2020c). *Tiger Pro 72HC-BDVP*. <https://jinkosolar.eu/files/jinko/module/datasheets/en/EU-JKM525-545M-72HL4-BDVP-F1-EN.pdf>
- Solar, J. (2020d). *Tiger Pro 72HC-TV*.
- Solar, J. (2021). *JinkoSolar - Building Your Trust in Solar*. <https://jinkosolar.eu/en/>
- SUNCOLOMBIA. (2021). *Nuestras cifras - Suncolombia*. <https://www.suncolombia.com/nuestras-cifras/>
- SUPERSERVICIOS. (2017). Zonas no Interconectadas - ZNI Diagnóstico de la prestación del servicio de energía eléctrica.

- <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/SSPD%20Publicaciones/Publicaciones/2018/Sep/diagnosticozni-superservicios-oct-2017.pdf>
- Tao, S., Cao, X., & Bobbert, P. (2019). *Accurate and efficient band gap predictions of metal halide perovskites using the DFT 1/2 method: GW accuracy with DFT*.
<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1705/1705.10070.pdf>
- Toroghi, S. H., & Oliver, M. E. (2019). Framework for estimation of the direct rebound effect for residential photovoltaic systems [Article]. *Applied Energy*, 251, 16, Article 113391.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113391>
- UPME. (2021). Distribución de energía eléctrica SIN por sector. In.
- UPME, U. A. m. E. (2015a). *Integración de las energías no renovables en Colombia*. Retrieved from
http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVABLES_WEB.pdf
- UPME, U. A. m. E. (2015b). *Plan energético nacional Colombia: ideario energético 2050*. Retrieved from https://www1.upme.gov.co/Documents/PEN_IdearioEnergetico2050.pdf
- UPME, U. A. m. E. (2016a). *Plan de expansión de referencia generación-transferencia 2016-2030*.
http://www.upme.gov.co/Docs/Plan_Expansion/2016/Plan_GT_2016_2030/Plan_GT_2016_2030_Final_V1_12-12-2016.pdf
- UPME, U. A. m. E. (2016b). *Seguridad energetica plan Colombia. Entregable 3: Informe final*. Retrieved from
<https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/1314/1/Seguridad%20Energ%c3%a9tica%20UPME-CIDET%20Entrega%20Final.pdf>
- UPME, U. A. m. E. (2017). *Energía Eléctrica SIN (Sistema interconectado Nacional). Distribución de generación de energía eléctrica SIN*.
<https://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Paginas/PETROLEO.aspx>
- UPME, U. A. m. E. (2018). *Boletín estadístico de minas y energía 2018*. Retrieved from
https://www1.upme.gov.co/PromocionSector/SeccionesInteres/Documents/Boletines/Boletin_Estadistico_2018.pdf
- UPME, U. A. m. E. (2019). *Comunicado de prensa 05-2019. Día histórico para las energías renovables en Colombia: por primera vez, la energía del sol y del viento llegará, a precios más bajos, a los hogares colombianos*.
https://www1.upme.gov.co/SalaPrensa/ComunicadosPrensa/Comunicado_05_2019.pdf
- UPME, U. A. m. E. (2021). Power BI Report. Informe de registros de proyectos de generación. Proyectos vigentes por departamento.
<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojODRjNWY2NmEtZDI5MC00OGJhLWVmMTItYmU3NTNiMDE4MTM2IiwidCI6IjUxYzFhOGQwLTMyYmQtNDZlYi05YmRILTkxZTZlNGU3MDRmZCJ9>
- Vallejo Lozada, W. A. (2012). Síntesis de capas buffer para celdas solares de película delgada [<http://purl.org/dc/dcmitype/Text>]. *Elementos*, ISSN-e 2248-5252, Vol. 2, N° 2, 2012 (*Ejemplar dedicado a: Elementos*), págs. 84-91.
<https://doi.org/https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5085367.pdf>
- Villar, F. (2010). *Dispositivos fotovoltaicos de capa delgada a baja temperatura* Universitat de Barcelona]. http://www.ub.edu/ges/Tesis_FVillar.pdf
- Wilson, G. M., Al-Jassim, M., Metzger, W. K., Glunz, S. W., Verlinden, P., Xiong, G., Mansfield, L. M., Stanbery, B. J., Zhu, K., Yan, Y. F., Berry, J. J., Ptak, A. J., Dimroth, F., Kayes, B. M., Tamboli, A. C., Peibst, R., Catchpole, K., Reese, M. O., Klinga, C. S.,

- Denholm, P., Morjaria, M., Deceglie, M. G., Freeman, J. M., Mikofski, M. A., Jordan, D. C., TamizhMani, G., & Sulas-Kern, D. B. (2020). The 2020 photovoltaic technologies roadmap [Article]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 53(49), 47, Article 493001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab9c6a>
- Wirth, H., Weiß, K.-A., & Wiesmeier, C. (2016). *Photovoltaic Modules : Technology and Reliability* [Book]. De Gruyter.
- World Economy forum. (2020). *Fostering Effective Energy Transition*. http://www3.weforum.org/docs/WEF_Fostering_Effective_Energy_Transition_2020_Edition.pdf
- Yamashita, K., & Tanaka, H. (2010). *Photovoltaics : Developments, Applications and Impact* [Book]. Nova Science Publishers, Inc.
- Yao, M. Q., & Cai, X. (2019). An Overview of the Photovoltaic Industry is Status and Perspective in China [Article]. *Ieee Access*, 7, 181051-181060. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2959309>
- Zhang, F., Deng, H., Margolis, R., & Su, J. (2015). Analysis of distributed-generation photovoltaic deployment, installation time and cost, market barriers, and policies in China [Article]. *Energy Policy*, 81, 43-55. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.02.010>
- Zhang, Y. H., Ren, J., Pu, Y. R., & Wang, P. (2020). Solar energy potential assessment: A framework to integrate geographic, technological, and economic indices for a potential analysis [Article]. *Renewable Energy*, 149, 577-586. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.071>

Resumen Analítico Especializado RAE

Tema: Principales tecnologías de la Energía Solar Fotovoltaica, identificación de sus características técnicas, fortalezas y retos, incluyendo un análisis correlativo entre sus propiedades.

Título: Análisis comparativo de las principales tecnologías de la Energía Solar Fotovoltaica: Alcance comercial, aplicaciones y retos.

Autores: Angie Ximena Males Ramos

Director: MSc. Luis Alejandro Duarte Rodríguez

Fuentes Bibliográficas: Se consultaron 92 referencias bibliográficas entre ellas documentos creados por entidades como la UPME, CREG, NREL, CELSIA, EIA, IDEAM, FIRST SOLAR, JINKO SOLAR, SIGIPSE, MINERGIA, SUPERSERVICIOS, documentos académicos y libros, entre otros que pueden consultar en el documento original.

Resumen: En este documento se hace un recorrido sobre diferentes celdas fotovoltaicas, sus tecnologías y su impacto en el mercado de la energía eléctrica seccionado por capítulos. En el capítulo 1 se analizan las celdas a base de Si la tecnología de mayor difusión en el mundo, identificando su proceso de producción, el funcionamiento del material semiconductor que las componen, funcionamiento eléctrico y rendimientos de cada celda de acuerdo a los diferentes materiales del Si; en el capítulo 2 se recopilan las celdas solares de película delgada en las cuales se incluye las celdas de a-Si, de materiales III-V, CdTe, Calcopiritas y SnS, identificando sus rendimientos, estructura y funcionamiento; en el capítulo 3 se identifican las características de las celdas a base de materiales orgánicos, sus rendimientos, estructuras y funcionamiento, donde incluyó las celdas solares orgánicas a base de polímeros, sensibilizadas con tinte y Perovskita; en el capítulo 4 se genera un acercamiento a los índices de consumo de energía eléctrica en el mundo y en Colombia y finalmente en el capítulo 5 se hace una evaluación del estado de las tecnologías fotovoltaicas en el contexto nacional e internacional, haciendo énfasis al marco normativo nacional orientado a incentivar su difusión, la viabilidad que estas tienen en el país partiendo desde los apoyos jurídicos y su estado actual en el mercado energético.

Palabras Clave: Solar energy, Photovoltaic cells, Cell performance, Energy market.

Contenido:

Capítulo 1. Tecnología del Silicio Cristalino.

Producción de celdas a partir de Silicio.

Propiedades y caracterización de las celdas solares a base de silicio cristalino.

Diseños avanzados para mejorar las celdas de Silicio tipo Wafer

Capítulo 2. Tecnología de película delgada

Células de película delgada de Silicio Amorfo (a-Si)

Celdas fotovoltaicas materiales III-V

Células de película delgada a base de Cadmio Telurio (CdTe).

Células solares basadas en Calcopiritas

Células de película delgada a base de sulfuro de estaño (SnS)

Métodos de deposición de las películas delgadas

Capítulo 3. Tecnologías a base de materiales orgánicos

Celdas solares orgánicas CSO.

Celdas sensibilizadas con tintes.

Celdas solares de Perovskita

Capítulo 4. Demanda de energía eléctrica.

Capítulo 5. El estado de las tecnologías fotovoltaicas en el mundo.

Conclusiones

Descripción del problema de Investigación: El aumento progresivo del consumo eléctrico, la alta concentración de personas en centros poblados, la existencia de ZNI, la dependencia para la generación de energía eléctrica a los hidrocarburos y las compensaciones incompletas por los impactos ambientales ocasionados por las hidroeléctricas, hacen fundamental la migración hacia sistemas generadores de energía descentralizados, en este contexto y gracias al potencial de radiación del país las tecnologías como la fotovoltaica se adapta perfectamente como solución; sin embargo, entre sus limitaciones se encuentra los costos de inversión, un contexto energético de relativa abundancia en referencia a los recursos hídricos en el país, dificultades socioculturales y políticas para su aceptación, en este contexto estas representan únicamente el 1.6 % de la canasta energética nacional, este bajo nivel de difusión es el reflejo de la falta de confianza que se tienen en esta tecnología.

Objetivos:

General: Analizar comparativamente las principales tecnologías desarrolladas en el campo de la energía solar fotovoltaica, con el propósito de identificar características diferenciadoras, ventajas, desventajas y retos a superar, a fin de lograr una mayor penetración en el mercado nacional colombiano.

Específicos:

Identificar las principales tecnologías de celdas solares fotovoltaicas desarrolladas hasta la actualidad, su funcionamiento, composición, arquitectura y eficiencias.

Determinar las características diferenciadoras de las tecnologías fotovoltaicas desarrolladas, a fin de favorecer su comprensión, disseminación y alcance comercial en el mercado nacional.

Reconocer las tecnologías fotovoltaicas que cuentan con mejores rendimientos frente a condiciones climáticas y/o geográficas poco favorables o adversas

Referentes Teóricos: Las referencias consultadas incluyen la descripción del esquema y funcionamiento de las celdas fotovoltaicas mencionadas en el contenido.

Referentes Conceptuales: Se consultaron planes energéticos nacionales, proyecciones y registros de proyectos energéticos solares, así como la normativa que aplica para cada uno de ellos; en el ámbito comercial se consultaron fuentes de empresas direccionadas al suministro y/o prestación de servicios relacionadas a la energía fotovoltaica.

Resultados: El rendimiento entre las celdas de Si, las celdas de película delgada y las celdas orgánicas muestran una brecha pequeña, lo que indica un avance constante en su desarrollo, ofreciendo las alternativas necesarias para la inclusión de la tecnología fotovoltaica en el mercado energético mundial. El mundo está avanzando a pasos agigantados en el desarrollo, difusión e implementación de la energía fotovoltaica en sus canastas energéticas y Colombia intenta mantenerse en este movimiento, lo hizo con la promoción de proyectos de energía solar fotovoltaica a gran escala, sin embargo, para un crecimiento descentralizado basándose en las energías fotovoltaicas aún se tiene mucho camino por recorrer, ya que este tipo proyectos a pequeña escala aún se mantiene en el concepto de poco rentables.

Conclusiones: Las tecnologías fotovoltaicas se encuentran en una constante evolución ofreciendo alternativas al mercado. Aún se deben cubrir detalles como la disponibilidad e impacto ambiental de algunos materiales componentes con el fin de obtener una producción completamente sostenible, lo cual se logrará a corto plazo con el paso actual que lleva la industria. El país aún no ve como objetivo real una producción descentralizada a base de energías fotovoltaicas, sin embargo, ya se dio el paso con normativa que incentiva esta transición y con proyectos a gran escala que apoyan las energías renovables como parte de la matriz energética nacional.