



EVALUACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS EN PANELES FOTOVOLTAICOS PARA  
USARSE EN COLOMBIA

MODALIDAD DE SEMINARIO

JULY ALEXANDRA MÁRQUEZ LAGOS  
CC 1096198440  
RAFAEL ANTONIO RIVERO TANGARIFE  
CC 1098763131

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER**  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA  
TECNOLOGIA EN OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ELECTROMECHANICO  
**BARRANCABERMEJA (14/Agosto/2021)**



EVALUACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS EN PANELES FOTOVOLTAICOS PARA  
USARSE EN COLOMBIA

MODALIDAD DE SEMINARIO

JULY ALEXANDRA MÁRQUEZ LAGOS  
CC 1096198440

RAFAEL ANTONIO RIVERO TANGARIFE  
CC 1098763131

**Trabajo de Grado para optar al título de**  
Tecnólogo en Operación y Mantenimiento Electromecánico

**DIRECTOR**  
ALONSO DE JESUS RETAMOSO LLAMAS

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER**  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA  
TECNOLOGÍA EN OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ELECTROMECAÍNICO  
**BARRANCABERMEJA (14/Agosto/2021)**

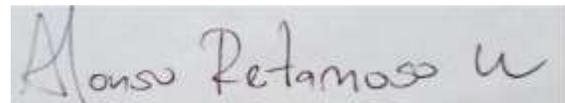
Nota de Aceptación

Aprobado

---

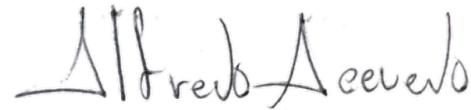
---

---



---

Firma del Director



---

Firma del Evaluador

## **DEDICATORIA**

Dedicamos este trabajo a Dios quien nos guía y brinda las capacidades necesarias para desarrollar y cumplir una meta en el camino de la educación. Y nuestra familia que siempre están presentes para brindarnos su apoyo incondicional.

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias a nuestra familia y seres queridos que a lo largo de este camino de formación nos apoyaron y motivaron en esta etapa de crecimiento personal y académico.

A los docentes que hicieron parte de nuestra formación académica y nos brindaron sus conocimientos en cada una de sus áreas.

## **TABLA DE CONTENIDO**

### **RESUMEN EJECUTIVO**8

### **INTRODUCCIÓN**9

#### **1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**10

##### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**10

##### **1.2. JUSTIFICACIÓN**12

##### **1.3. OBJETIVOS**14

##### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**14

##### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**14

##### **1.4. ESTADO DEL ARTE**15

#### **2. MARCO REFERENCIAL**19

##### **2.1. 19**

#### **3. DISEÑO DE LA INVESTIGACION**25

#### **4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO**27

#### **5. RESULTADOS**37

#### **6. CONCLUSIONES**40

#### **7. RECOMENDACIONES**42

#### **8. ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

#### **9. ANEXOS**46

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 1.** En el efecto fotoeléctrico.20

**Figura 2.**31

## RESUMEN EJECUTIVO

Esta investigación se realizó con el objetivo de reconocer la mejor opción técnica y financiera dentro de las cuatro tecnologías descritas en el documento: celdas monocristalinas, policristalinas, amorfas y perovskita, teniendo en cuenta la distribución de la radiación solar en Colombia. Para cumplir con este propósito se propuso desarrollar una investigación de tipo explicativa, con un enfoque cualitativo, a través del método analítico empleando la técnica de revisión documental para recolectar información. En el desarrollo de la investigación se pudo identificar a Colombia como un país con alto potencial de radiación solar debido a su ubicación espacial en el globo y su diversidad de pisos térmicos, llegando a alcanzar un promedio diario de radiación solar de  $4.5\text{kWh/m}^2$  significativamente superior al  $3.9\text{kWh/m}^2$ , que es el promedio mundial, siendo el departamento de La Guajira el territorio más ideal debido a valores del orden de los  $6.0\text{kWh/m}^2$ . Siguiendo estas disposiciones se escogió la tecnología de celdas fotovoltaicas de silicio como la más apropiada debido a su amplio desarrollo mundial, el tiempo que ha tenido en la industria y su alto índice de efectividad (aprox. 25%) y porque sigue siendo superior al resto de tecnologías, además, de ser un elemento abundante en la naturaleza.

**PALABRAS CLAVE.** Celdas Fotovoltaicas, Energía Solar, Radiación Solar, Silicio.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la energía solar es una de las opciones más viables para la generación de energía eléctrica, la cual está tomando fuerza año tras año, al ser una fuente sin contaminación y un recurso renovable que solo necesita de la radiación solar para producir electricidad. Dentro del presente proyecto se busca conocer cuáles son las tecnologías más recientes en paneles fotovoltaicos, considerando la energía del sol como una opción viable en Colombia para la transición a energías más sustentables, para suplir la demanda de energía eléctrica por su fácil instalación y una buena opción para zonas apartadas del país que no cuentan con el servicio de interconexión a la red eléctrica. Para lograr este objetivo se empleó el método analítico, haciendo una lectura y análisis de bibliografía relacionada con la energía solar fotovoltaica y las actuales tecnologías utilizadas en la fabricación de celdas solares, así como la situación de radiación en Colombia.

Con base en las especificaciones técnicas de los paneles fotovoltaicos se podrá analizar el desempeño en diferentes zonas de Colombia teniendo en cuenta las condiciones de radiación solar del país y conocer la favorabilidad económica al adquirir un sistema de paneles fotovoltaicos.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Son tres los tipos principales de tecnologías de celdas solares que existen hoy en el mercado para llegar a generar energía eléctrica: monocristalinas, policristalinas y amorfas, diferenciándose en eficiencia gracias a las características del material con el que se fabrican. (Eraso et al., 2019) Con el pasar del tiempo son más los avances y desarrollos en la tecnología de las celdas fotovoltaicas para mejorar la eficiencia en el proceso de transformar la energía que se obtiene del sol en electricidad. Siendo una de las principales energías renovables y de mayor sostenibilidad que existen en el mundo, el recurso solar es accesible e inagotable en la mayoría de los lugares donde se requiera la implementación de un sistema fotovoltaico. (González Prado, 2018)

La radiación solar es la energía recibida por el sol que llega al planeta mediante la ondulación de campos magnéticos y eléctricos (Aravena, 2009), este tipo de radiación puede variar su valor según la altitud y condiciones climáticas de la zona donde se implementará un sistema fotovoltaico. Los materiales usados en las celdas absorben los fotones de la radiación y producen el efecto fotoeléctrico generando así la electricidad. (Hernandez et al., 2011)

Con base en los mapas de radiación solar, ciudades como Medellín, Cali, Tunja y Bogotá, registran datos de radiación dentro del rango de 4 y 4,6 kW/m<sup>2</sup>, que garantizan generar electricidad mediante el uso de la tecnología fotovoltaica. Colombia es poseedor de un buen recurso solar, ya que al compararse con un país como Alemania, que maneja datos de irradiación solar de (3,0 kWh/m<sup>2</sup>) por día, siendo este un valor que se ve afectado debido a las estaciones del año que se presentan en esa zona del mundo, considerándose un país que aprovecha muy bien esta fuente energética. (Gómez et al., 2018)

Las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS) no cuentan con un estudio que permita relacionar la oferta de tecnología fotovoltaica con las condiciones particulares de la radiación solar en Colombia. Con este documento se pretende resolver el interrogante: ¿Cuál es la mejor opción técnica y financiera dentro de las cuatro tecnologías descritas en el documento con las condiciones de radiación solar de Colombia?

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad la demanda energética en Colombia se encuentra en aumento, las principales fuentes de suministro energético a nivel nacional son las hidroeléctricas y termoeléctricas, fuentes que contaminan el medio ambiente y de difícil acceso para algunas zonas rurales, estas situaciones impulsan a buscar una solución que brinde una mejor alternativa en energía limpia y amigable con el ambiente. Colombia cuenta con una de las ubicaciones más privilegiadas en la obtención de radiación solar, permitiendo contar con un gran recurso de irradiación que alcanza valores en el rango de 4,0 a 4,5 kWh/m<sup>2</sup> (IDEAM, 2014) para la aplicación de sistemas fotovoltaicos en zonas urbanas, industriales o zonas rurales que no cuentan con red eléctrica.

En el Plan Energético Nacional 2020-2050, se destaca que para 2050, dentro de los escenarios de modernización se encuentra la ampliación de forma significativa de la capacidad que se pueda instalar, donde se registran datos de consumo en 2019 de 17GW a incrementar 40GW, donde se prevé en 30 años un incremento del 135%. La energía solar ocupa el 8% en la oferta energética del país. Finalmente, mencionan un perfil de crecimiento para la energía renovable dentro del parque generador colombiano del futuro. Teniendo una participación actual baja, en 2030 podrían representar el 17 % de la capacidad y en 2050 más del 40 %. (UPME, 2020)

También plantea la necesidad de diversificar dentro de la demanda de energía nacional, la promoción de sistemas descentralizados y difusión de energías más sustentables (UPME, 2015), que puedan llegar a producir energía para suplir la demanda en zonas remotas no conectadas al Sistema Interconectado Nacional o los centros urbanos más grandes del país, reduciendo las pérdidas de energía ocasionadas por transporte y evitando los daños ambientales ocasionados por la producción de energía con sistemas centralizados.

A pesar de ser un país con gran potencial fotovoltaico, no se ha desarrollado la confianza para invertir en la difusión de proyectos que la utilicen como fuente productora descentralizada; queriendo invertir en centrales solares, en 2017 la empresa privada Celsia realizo una gran inversión en la instalación de la primera granja fotovoltaica en Colombia (CELSIA, 2021) y por parte del gobierno nacional se espera aumentar la capacidad energética en 2022 con base en fuentes no convencionales al 12% de energía renovable (Minenergía, 2021); en la UPME solo se tienen registros de menos de 170 proyectos con una capacidad de 20 MW a la fecha, mostrando que aún se está en los primeros pasos en el país para sistemas descentralizados con base en energías fotovoltaicas.

Con esta información, se busca dar un mejor aprovechamiento a los desarrollos tecnológicos alcanzados, permitiendo conocer y elegir la tecnología que mejor se ajuste a las características geográficas, necesidad y presupuesto de los proyectos fotovoltaicos que se deseen implementar a lo largo del país.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Definir un esquema de evaluación que identifique las tecnologías de paneles fotovoltaicos que mejor funcionen en Colombia.

#### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar las cuatro tecnologías de paneles fotovoltaicos más utilizadas dentro del segmento de generación fotovoltaica a nivel mundial.
- Presentar las condiciones de radiación solar en Colombia para el funcionamiento de paneles fotovoltaicos.
- Contrastar la eficiencia de cada tecnología de acuerdo con las condiciones de radiación solar de Colombia.

#### 1.4. ESTADO DEL ARTE

Son numerosas las investigaciones e iniciativas en materia de tecnología solar fotovoltaica desarrolladas en el país, todas encaminadas a impulsar el potencial energético mientras se transita a métodos más sostenibles, teniendo en cuenta las condiciones, el panorama actual y los desafíos existentes. La discusión es amplia y animada y se replica en la mayor parte de los países del planeta, esencialmente por tratarse de un tema transcendental para el porvenir del ser humano como especie.

La investigación titulada Centrales fotovoltaicas: analizando a Colombia frente a Latinoamérica, desarrollada por Chacón, Hernández y Moreno en el año 2015, plantea una revisión de la forma en la que se han implementado las tecnologías fotovoltaicas en los países de América continental, dividida en las regiones de Centro (México, Honduras, El Salvador, Costa Rica, Panamá, Guatemala y Nicaragua) y Sur América (Uruguay, Ecuador, Argentina, Bolivia, Perú, Chile, Venezuela y Paraguay) para efectos del trabajo, señalando la posición que ocupa Colombia frente a estos; para esto, se consideraron el ámbito normativo, los proyectos en funcionamiento, las proyecciones futuras y el potencial energético de cada país. (Chacón et al., 2016) De esta forma, los investigadores consideran que:

La mayoría de estos países han venido trabajando desde hace tiempo en sus marcos regulatorios, y han implementado proyectos y directrices propias y en algunas casos como región, tal como se puede ver en similitud de las políticas en el continente centroamericano, la cual es la zona donde se ha podido observar el mayor crecimiento de centrales fotovoltaicas, a través de una constante inversión tanto pública como privada, lo que contrasta con la parte de países en este estudio pertenecientes a Sur América, en donde sí se buscan objetivos y metas en cuanto a generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables, donde cada país toma su propia dirección en este ámbito. (pág.52)

Respecto a Colombia, la investigación arroja que es vital que en el país se establezca una reglamentación clara de la Ley 1715 de 2014 para lograr desarrollar el sector fotovoltaico, dicha reglamentación deberá contemplar la aplicación de esta tecnología en proyectos de gran escala, aprovechando los recursos naturales y el potencial del país. (Chacón, et al., 2016)

Por otra parte, la investigación desarrollada en el año 2017: La energía solar fotovoltaica en Colombia: potenciales, antecedentes y perspectivas, tuvo como objetivo principal evidenciar y analizar el uso, beneficios y favorabilidad de las tecnologías fotovoltaicas para la generación de energía, contemplando la ubicación geográfica del país, las zonas en las que se ha hecho mayor inversión y las que presentan un mayor potencial para llevar a cabo estas tecnologías (Gómez et al., 2017). Como conclusiones del trabajo, los autores destacan que, a pesar de la favorable posición geográfica de Colombia debido a que gran parte del territorio recibe altos niveles de radiación que se mantienen durante varias horas al día, el progreso de estos proyectos es lento y se ve entorpecido por el desconocimiento que tienen las personas frente a sus aplicaciones, utilidades y acceso. Para Gómez et al., (2017) “la mayoría de estudios académicos no han podido ser llevados a la práctica industrial masiva por el poco conocimiento de entidades de apoyo financiero, técnico existentes y por falta de políticas públicas o reglamentación” (pág. 12) lo cual afecta negativamente el avance y desarrollo de estas alternativas en el país, finalizan enfatizando que al invertir e implementar sistemas solares fotovoltaicos es posible incrementar la capacidad de energía eléctrica, supliendo en mayor nivel la demanda del recurso en el país, (Gómez et al., 2017) en el mismo sentido, los investigadores señalan la importancia de comprender que tecnología se utilizará en determinada posición geográfica, así como su costo, de acuerdo a la demanda de potencial a producir, pues puede ser eficiente pero tener un precio muy elevado.

En el estudio que lleva por título “Rol de la energía solar y eólica en la transición energética en Colombia: actualidad, perspectivas y retos” el investigador aborda de manera integral el estado actual de las energías renovables en el planeta, las características de las energías renovables del país, la naturaleza de los mercados energéticos y las propiedades de las Energías Renovables, definiendo las probables regiones con mayor potencial para poner en marcha granjas solares y proyectos eólicos. (Escobar, 2021) Para el autor, el país tiene que encaminar sus acciones en:

Fortalecer y cambiar la red física, en zonas interconectadas y no interconectadas del país mejorar la infraestructura de la operación, ya que muchos de los proyectos actuales de energías no convencionales dejan en el olvido las comunidades de regiones como el Pacífico, la Amazonia y la Orinoquía. (pág. 72)

De esta forma, podrá garantizar mayor equidad en la materialización de los derechos de los ciudadanos al proveer íntegramente el servicio de energía. Concluye su estudio recalcando la urgencia de formar técnica y profesionalmente a las personas interesadas en formular, ejecutar y mantener proyectos de energía solar y eólica.

La investigación titulada “Evaluación del potencial de generación fotovoltaica en la ciudad de Quibdó, Chocó” del año 2016, se trazó como meta evaluar datos climáticos que permitieran conocer los porcentajes de temperatura y radiación solar del Municipio de Quibdó, buscando identificar la viabilidad de implementar sistemas de generación de energía eléctrica fotovoltaica que se conecten a la red eléctrica, los datos de referencia fueron los de la estación meteorológica de la Universidad Tecnológica del Chocó y la del IDEAM–110450010, que se ubica en el Aeropuerto el Cariño de la Ciudad de Quibdó. (Agudelo et al., 2016). El resultado arrojado por esta evaluación demuestra que en Quibdó el comportamiento de la radiación tiene variaciones debido a las condiciones propias del clima de la región y su valor máximo en la curva diaria de la radiación solar se da entre las doce del día y la una de

la tarde, de igual forma, se pudo determinar que “en la región se registran temperaturas máximas entre 27 y 31°C y temperaturas mínimas entre 22 y 23°C” (pág.122) por ende, los autores estiman que implementar un sistema fotovoltaico es viable si se realiza bajo estas condiciones mencionadas, pues se logra recuperar la inversión antes de la vida útil del proyecto. (Agudelo et al., 2016)

La tecnología fotovoltaica ha sido incorporada desde los últimos años del siglo XX en muchas naciones, abriéndose espacio desde investigaciones y proyectos piloto para demostración, hasta ser implementada a través del apoyo de instituciones gubernamentales que han posibilitado el avance tecnológico en pocos años. En países como España, Italia han avanzado en el desarrollo de dichas tecnologías, aprovechando las zonas con niveles de radiación solar buenos para la obtención de energía de origen fotovoltaico. (Báez & Forero, 2018)

Por último, (Maricar et al., 2003) Los autores describen como la tecnología solar es una fuente fiable para llegar a utilizar en Malasia siendo una forma prometedora de generar energía económica, accesible y confiable, que puede llegar a zonas aisladas del país, exponiendo cómo ha evolucionado la tecnología solar hasta la actualidad. En Malasia este tipo de energía se encuentra en fase experimental, se ha iniciado un proyecto preliminar para incluir paneles fotovoltaicos con la capacidad de 5kW, este proyecto es parte de un destacado PNUD de cuatro años (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo) iniciativa conocida como Proyecto Mejoramiento de la Eficiencia Energética en la Industria. Está siendo implementado por una organización de investigación conocida como el Malaysia Energy Center.

El potencial de la energía solar es grande, dado que Malasia recibe entre 4.5 y 8 horas de sol por día y, como país ecuatorial, una cantidad sustancial de Radiación solar durante todo el año. Malasia recibe sobre 5.5kWh/m<sup>2</sup> de insolación solar por día y un

promedio diario nivel de intensidad de energía solar - en una superficie horizontal de aproximadamente  $19,8\text{MJ/m}^2$ . (Maricar et al., 2003)

## **2. MARCO REFERENCIAL**

### **2.1. MARCO CONCEPTUAL**

## Efecto fotoeléctrico

Se conoce como efecto fotoeléctrico al procedimiento a través del cual se desprenden electrones de un material debido a la acción de la radiación (García, 2010) en este fenómeno el “haz de partículas de luz, que se compone de fotones, incide en los electrones de un metal y les proporciona energía que los arranca de la configuración. Este proceso de movilidad de electrones genera la corriente eléctrica.” (Khan Academy, s.f.). Según García (2010) el efecto fotoeléctrico tiene dos principios esenciales:

- Cada sustancia tiene una mínima frecuencia o umbral dentro de la radiación electromagnética dónde no libera electrones a pesar de una alta radiación.
- Al aumentar la intensidad de radiación que incide sobre un metal aumenta la emisión electrónica, debido a que existe mayor energía para la liberación de electrones.

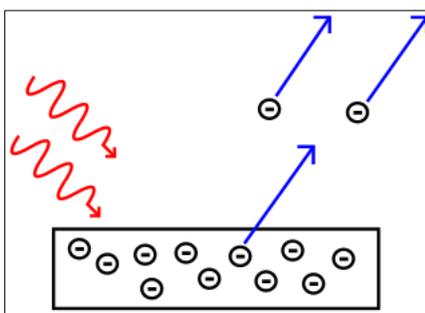


Figura 1. Efecto fotoeléctrico

## Celda solar

Se conoce como celda solar, de acuerdo con González (2018) a la tecnología empleada para convertir la luz solar en electricidad, lo cual se logra debido a las características de los

semiconductores y a la juntura PN, que hace posible sustraer los electrones alterados pertenecientes a la célula a un circuito exterior antes que vuelvan a su condición de equilibrio térmico, de manera que estén aptos para realizar un trabajo.

Las celdas usadas más frecuentemente son las de silicio cristalino y multicristalino que utilizan una unión de tipo PN y contactos en las dos caras, además, estas proveen alrededor de 0,5 voltios y una cantidad de corriente de  $35 \text{ mA/cm}^2$  cuando las ilumina el sol en un día claro a  $1000 \text{ W/m}^2$ , considerada como irradiancia de referencia estándar. (González Prado, 2018) Estos dos materiales emplean silicio ultrapuro, derivado del que se usa en la industria microelectrónica.

## **Radiación Solar**

Se trata de la energía emitida por el sol, que se extiende en todas las direcciones mediante ondas electromagnéticas, generándose en las reacciones del hidrógeno que suceden en el núcleo del sol gracias a la fusión nuclear y que luego es expulsada por la superficie solar, esta energía es fundamental en la dinámica de los procesos tanto atmosféricos como climáticos. (IDEAM, 2014)

Existen dos tipos de radiación solar: la radiación solar directa, que emana del sol en una línea recta y directa, y la radiación de tipo difusa, que al haber sido reflejado, dispersado o desviado procede de diversas direcciones. La suma de estas dos radiaciones configura la radiación solar total o global. (Chacón et al., 2016)

## **Silicio**

Este elemento químico se halla en el grupo número 14 o IVA en la tabla periódica, debido a que es muy abundante ( $2,57 \times 10^5$  p.p.m.) ocupa el puesto dos entre los elementos más

frecuentes en el manto terrestre, seguido del oxígeno:( $4,95 \times 10^5$  p.p.m.), al ser común y de fácil obtención se ha convertido en una materia prima accesible. (Martínez, s.f.) Sus propiedades lo convierten en un material base en la industria electrónica, empleándose en la fabricación de transistores, celdas solares y dispositivos semiconductores, se usa también en la fabricación de vidrio, en la industria cerámica, como elemento de aleación en fundiciones y otra gran variedad de aplicaciones. (pág. 14)

### **Energía Solar**

Se define la energía solar como aquel tipo de energía que proviene del sol a través de la radiación, esta puede ser aprovechada para calentar bien sea de forma directa o mediante dispositivos colectores; sus utilidades y beneficios son diversos y se caracteriza por tener una naturaleza renovable, limpia y de bajo costo. (Barbosa et al., 2010)

### **Energía Fotovoltaica**

Esta energía es generada a partir del fenómeno conocido como efecto fotoeléctrico, el cual consiste en que de acuerdo con ciertas situaciones, los fotones liberan electrones de los átomos a los que pertenecen, surgiendo de esta forma la corriente eléctrica. Sin embargo, para que tenga lugar la expulsión de los electrones es necesaria una cantidad de energía específica, en consecuencia, la totalidad de la radiación solar no tiene la posibilidad de liberar los electrones, solamente, a la que la longitud de onda conduce una energía asociada suficiente. (Báez y Forero, s.f.)

### **Celdas Solares Monocristalinas**

Las primeras celdas solares de Si-c (siliciomonocristalino) se fabricaron en 1954 (con uniones n-p mediante la difusión térmica del boro en una oblea tipo-n. Estas celdas son fabricadas con silicio de la mayor pureza y calidad, esta característica es la que le permite

ser tan eficiente, dándole mejor capacidad y eficiencia en niveles de baja luminosidad (Matsumoto, 2010). Las características principales de estas celdas solares son, de acuerdo con Matsumoto, (2010)

1. Materia prima abundante; donde la radiación solar tiene una baja densidad energética, se requiere material para uso práctico y de suficiente área.
2. Se puede tomar como una tecnología madura, ya que se asemeja en la fabricación con los procesos de la microelectrónica o de los circuitos integrados.
3. En comparación con el silicio multicristalino o el amorfo hidrogenado, puede desarrollar una mayor eficiencia en convertir la luz a electricidad.
4. Los módulos son garantizados por sus fabricantes por más de 20 años de funcionamiento, siendo un dispositivo con propiedades eléctricas estables. (pág. 33)

### **Celdas Solares Policristalinas**

Los paneles solares policristalinos (en ocasiones llamado multicristalino) están hechos de células solares policristalinas; para crear estas celdas se emplea silicio que es sometido a menos procesos de cristalización, por lo que no elimina todas las impurezas, El proceso es diferente, se funde en bruto el silicio y se vierte en un molde cuadrado, lo que tiene como resultado que las láminas sean cuadradas perfectas, sin embargo, las impurezas dan paso a la formación de policristales que afectan la eficiencia de la celda. (EcoInventos, 2019)

### **Celdas Solares De Perovskita**

Este tipo de material denominado perovskita, actualmente utilizado para la producción de celdas solares fotovoltaicas es descrita por la formula general  $ABX_3$ , donde A es un catión

orgánico o inorgánico (cesio, metilamonio), B un catión metálico como el plomo y un anión denominado X (bromo, haluro o yodo).

La perovskita se puede encontrar en los sistemas cristalinos principales como son el cúbico, tetragonal o el ortorrómbico. La temperatura será quien provoque la transición entre estas estructuras. Estos materiales absorben de forma eficiente la luz, debido a la banda gap que poseen. Este hecho y las propiedades optoelectrónicas que presentan, las hacen ideales para su utilización como materiales fotovoltaicos: un alto coeficiente de absorción, una elevada movilidad intrínseca de portadores libres, un amplio espectro de absorción son unas de las características óptimas para tener en cuenta. (Ramos S. , 2018)

### 3. 3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación es de tipo explicativo, entendida por Hernández et al. (2014) como aquella investigación que va “más allá de la descripción de conceptos o fenómenos o del establecimiento de relaciones entre conceptos; es decir, están dirigidos a responder por las causas de los eventos y fenómenos físicos o sociales” (pág. 95) su enfoque tiene un carácter cualitativo, orientado principalmente a profundizar en casos específicos sin ánimos de hacer generalizaciones, buscando describir y cualificar un fenómeno particular teniendo en cuenta los factores más importantes y determinantes. Del mismo modo, el método aplicado fue el análisis y se empleó como método para la recopilación de información la revisión documental, que “abarca la ubicación, recopilación, selección, revisión, análisis, extracción y registro de información contenida en documentos” (Hurtado, 2010) recopilando información existente sobre un tema de interés, buscando identificar variables que se relacionen directa o indirectamente con este y obtener toda la información posible que permita tener un conocimiento profundo del tema.

Esta investigación se llevó a cabo en tres (3) fases, detalladas así:

**Fase 1:** Rastreo y selección documental. En esta primera fase se realizó una búsqueda de material bibliográfico (artículos científicos, tesis de grado, artículos en revistas indexadas, libros electrónicos, entre otros) que facilita al autor un estudio del tema en cuestión. Los temas abordados fueron:

1. Identificación de tecnologías fotovoltaicas existentes.
2. Expectativas sobre las tecnologías y potencialidades de cada una.
3. Características de las tecnologías fotovoltaicas, destacando argumentos a favor de cada una.

**Fase 2:** Análisis: contextualización de Colombia en materia de tecnologías fotovoltaicas. Después de seleccionar la información de interés esta se analizará e interpretará, teniendo en cuenta las potencialidades, posibilidades y contexto del país respecto a la tecnología fotovoltaica. Se accedió a información de carácter público sobre las condiciones de la radiación en Colombia manejadas por el IDEAM, UPME y PVGIS.

**Fase 3:** Esta última fase consistió en construir argumentos que demostrarán cual podría ser el resultado de implementar alternativas tecnológicas para la obtención de energía, en este caso, las tecnologías de paneles fotovoltaicos, en un país con las características de Colombia.

#### 4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

El acelerado crecimiento poblacional de los últimos siglos ha tenido como consecuencia natural la intensificación de actividades antrópicas que han impactado el ecosistema y los recursos naturales de los que dispone el hombre para su supervivencia, la contaminación de suelos, del agua y del aire que degrada los ecosistemas ha encendido las alarmas de las naciones del mundo, convirtiéndose en tema de especial interés en los escenarios políticos y sociales, donde los debates giran en torno a las alternativas que hagan posible una transición a métodos más sostenibles. Colombia no es ajena a esta necesidad, por lo que el compromiso de cambiar a energías más sustentables se reflejó en el Plan Nacional Energético 2020-2050, documento de prospectiva energética que tiene como objeto “definir una visión de largo plazo para el sector energético colombiano e identificar las posibles vías para alcanzarla y los trade-offs entre ellas.” (UPME, 2020)

Los índices de radiación en Colombia lo ubican en una posición favorable ya que el país tiene un promedio al día multianual próximo a 4,5 kWh/m<sup>2</sup>, destacándose La Guajira, con una cifra promedio de 6,0 kWh/m<sup>2</sup> y la Orinoquia, con un valor menor, de esta forma, el potencial energético solar resulta propicio para un adecuado aprovechamiento. Conforme a los datos del Atlas de Radiación solar entregado por el IDEAM en Colombia la disposición multianual promedio de las diferentes regiones es:

REGIÓN	kWh/m <sup>2</sup> /Año
Orinoquia	1.643
Costa Pacífica	1.643
Amazonia	1.551
Guajira	2.190
Andina	1.643
Costa Atlántica	1.825

**Fuente:** creación propia a partir de datos tomados del Atlas de Radiación solar en Colombia.

Ahora bien, los datos tomados en un intervalo de tiempo de 10 años (2005-2015) arrojaron un promedio mensual de Irradiación horizontal global (IH) -sumatoria entre las componentes directa y difusa, se configura como la variable más importante para la valoración del potencial de la energía solar en una determinada región- en las siguientes ciudades y departamentos:

- **La Guajira:** marzo 196.37 kWh/m<sup>2</sup>, julio 204.53 kWh/m<sup>2</sup> y agosto 199.98 kWh/m<sup>2</sup> los meses con mayores niveles de radiación, mientras noviembre y diciembre presentan los menores niveles con 153.70 kWh/m<sup>2</sup> y 161.89 kWh/m<sup>2</sup> respectivamente.

- **Barranquilla:** marzo y julio como los meses con mayor promedio de radiación con 207.08 kWh/m<sup>2</sup> y 194.51 kWh/m<sup>2</sup> respectivamente, mientras que octubre, con 161.33 kWh/m<sup>2</sup> y noviembre con 153.22 kWh/m<sup>2</sup> se configuran como los meses con promedios más bajos.

- **Bogotá:** Enero presentó el mayor promedio entre los meses de radiación solar, con 151.58 kWh/m<sup>2</sup>, seguido de julio con 147.06 kWh/m<sup>2</sup> y agosto con 143.34 kWh/m<sup>2</sup>, entre tanto, abril y noviembre presentaron los niveles más bajos, con 123.09 kWh/m<sup>2</sup> para el primero y 121.19 kWh/m<sup>2</sup> para el segundo.

- **Arauca:** Enero: 172.12 kWh/m<sup>2</sup>, marzo: 166.60 kWh/m<sup>2</sup> y diciembre: 167.50 kWh/m<sup>2</sup> fueron los meses con mayor porcentaje de radiación solar, mientras que junio: 137.34 kWh/m<sup>2</sup> y julio: 143.35 kWh/m<sup>2</sup> fueron los que presentaron los porcentajes más bajos.

- **Chocó:** En Chocó los meses de julio y agosto presentaron los mayores niveles de radiación, con cifras de 138.84 kWh/m<sup>2</sup> y 140.03 kWh/m<sup>2</sup> respectivamente, por su parte, enero: 109.41 kWh/m<sup>2</sup>, febrero: 106.18 kWh/m<sup>2</sup>, noviembre: 112.80 kWh/m<sup>2</sup> y diciembre: 107.79 kWh/m<sup>2</sup> resultaron siendo los meses de menor nivel.

- **Caquetá:** Enero: 158.37 kWh/m<sup>2</sup>, octubre: 157.81 kWh/m<sup>2</sup> y diciembre: 157.77

kWh/m<sup>2</sup> fueron los meses con mayor radiación, mientras que mayo: 130.29 kWh/m<sup>2</sup>, junio: 122.75 kWh/m<sup>2</sup> y julio: 134.12 kWh/m<sup>2</sup> se contaron entre los más bajos.

- **Leticia:** en Leticia agosto, septiembre y octubre reportaron los más altos niveles de radiación, con 163.84 kWh/m<sup>2</sup>, 162.35 kWh/m<sup>2</sup> y 162.25 kWh/m<sup>2</sup> cada uno, por su parte, febrero: 125.83 kWh/m<sup>2</sup> y junio: 135.53 kWh/m<sup>2</sup> reportaron los más bajos.

- **Putumayo:** enero 154.59 kWh/m<sup>2</sup>, octubre 156.96 kWh/m<sup>2</sup> noviembre 150.91 y diciembre 154.91 kWh/m<sup>2</sup> alcanzaron los niveles más altos de radiación, frente a mayo: 127.26 kWh/m<sup>2</sup>, junio: 115.47 kWh/m<sup>2</sup> y julio: 123.60 kWh/m<sup>2</sup> tuvieron los niveles más bajos.

- **San Andrés Islas:** por último, en San Andrés Islas los meses con mayor índice de radiación fueron marzo 200.90 kWh/m<sup>2</sup>, abril 193.32 kWh/m<sup>2</sup> y mayo: 179.13 kWh/m<sup>2</sup>, mientras que noviembre fue el mes con menor índice, con 129.07 kWh/m<sup>2</sup> (**Anexo A**)

Para sacar provecho de estas condiciones el país debe enfocarse en diseñar, implementar, evaluar y replicar proyectos que busquen la obtención de energías limpias y sostenibles desde la energía solar fotovoltaica, recurso abundante y renovable. Entre las diversas opciones de energía renovable, la energía solar fotovoltaica es la que presenta mayor capacidad productiva, de acuerdo con las aproximaciones de una investigación publicada en la revista *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, que considera que el potencial técnico anual de generación eléctrica de la energía del sol vigente en 613 PWh por cada año (613.000 billones de vatios). (OpenMind, 2020). Se estima que para el año 2005 habían cerca de 145 sistemas fotovoltaicos, que contaban con una capacidad instalada de 208,06 kW (Anglés R, et al, 2008), para el año 2014 se contaba con aproximadamente 11,6 GW y para el 2015 se incrementó un 0,6 GW, para sumar un total aproximado de 12 GW, lo que reafirma la baja producción de electricidad desde las fuentes renovables, como lo es la energía solar fotovoltaica en el país.

Esta energía es generada desde el efecto fotoeléctrico, cuya definición es: la corriente eléctrica es producida debido a que los fotones expulsan electrones desde los átomos a los que pertenece, no obstante, es requerida energía determinada para producir la liberación de electrones, por lo cual, solo aquella radiación solar que tenga una longitud de onda con energía asociada suficiente contará con la capacidad de liberar dichos electrones. (Báez & Forero, 2018)

Las ventajas de emplear esta fuente energética son variadas, al respecto, Gómez et al expresan que, en primer lugar, causarían una reducción en el uso de otras fuentes energéticas, habría una demanda más baja de la red lo que conllevaría reducir los precios nacionales, pero sobre todo, el beneficio más significativo es que la radiación solar produce menores niveles de liberación de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), lluvia ácida, óxidos de azufre y efecto invernadero. (2017) A pesar de que la implementación de sistemas fotovoltaicos tiene altos costos, su utilidad es enorme al no tener altos gastos en mantenimiento, tener una larga vida útil y no emplear combustibles, por ende, invertir en sistemas fotovoltaicos resulta a la larga más económico. Además, no puede dejarse de lado los beneficios tributarios relacionados con el desarrollo de proyectos e iniciativas de energías limpias.

Para convertir energía solar a energía eléctrica se han usado tecnologías para la creación de paneles o celdas, que, según Soraca et al. (2018) se clasifican así:

Primera generación (Silicio cristalino), segunda generación (Silicio amorfo, indio de cobre, seleniuro de galio, etc.), las de tercera generación (sistemas multiunión p-n, semiconductores del grupo III y V en la tabla periódica) y las de nueva generación que aún están subdesarrolladas (perovskitas híbridas, CZTS, entre otros) (pág.15)

La tecnología que domina en el mercado de celdas fotovoltaicas es aquella que se fundamenta en el silicio, un elemento ampliamente usado en componentes electrónicos y

que se encuentra en la naturaleza contenido en rocas metamórficas de tipo cuarcita (que tienen contenidos de SiO<sub>2</sub> mayores al 90%) (Eraso et al., 2017) y que alcanza eficiencias hasta del 25% y más de 20 años de estabilidad. Estas pueden ser fabricadas a través de obleas monocristalinas, policristalinas o películas delgadas amorfas o nanocristalinas. Seguidamente, se presenta el proceso que tiene lugar en la transformación del silicio en celdas fotovoltaicas:

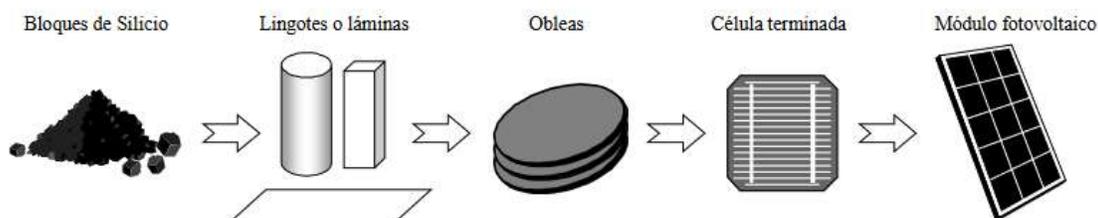


Figura 2. Diagrama silicio cristalino

### Tecnología de silicio monocristalino:

Este tipo de celdas son creadas partiendo de una pieza sólida de silicio cristalino inalterado, sin ningún tipo de borde granulado y que tenga una estructura cristalina cúbica de diamante donde los átomos estén dispuestos dando seguimiento a un patrón reiterativo y simétrico, pero no en la misma dirección. (Eraso Et al., 2017) De acuerdo con Manzanares (2008) existen tres métodos para el crecimiento de silicio monocristalino:

#### 1. Método Czochralski.

Es actualmente el método más utilizado en el crecimiento de cristales. Nombrado por J. Czochralski, quien al realizar la extracción vertical de cristales desde un crisol utilizando material fundido encontró la velocidad del proceso. El método se utiliza para crear silicio monocristalino dando la forma de un lingote cilíndrico, de mayor uso en dispositivos electrónicos. El silicio en un grado microelectrónico es fundido en un crisol de cuarzo, junto a un

susceptor de grafito, con la medida adecuada de dopantes. En forma de varilla el silicio monocristalino es puesto en contacto de superficie rotándolo y elevándolo lentamente. Controlando de manera adecuada la temperatura y la velocidad de elevación para producir el diámetro del cristal con pocos milímetros (llamado cuello), eliminando las dislocaciones que se forman por el encuentro del fundente y la semilla, reajustando estos datos para obtener el diámetro final del lingote.

## **2. Método de Zona Flotante.**

Es un proceso descubierto en 1962 por Theurer, está basado en la fundición localizada. Llega a producir la mejor calidad de material monocristalino. Inicia con un polisilicio en forma de cilindro de gran pureza, se usa de forma vertical la semilla monocristalina se une al cilindro en la parte baja cuando están rotando. Empieza desde el inicio de la semilla mediante bobinas inductoras de radiofrecuencia, que funden el Silicio. Al igual que en el método Czochralsk se produce un cuello que ayuda a liberar el cristal de dislocaciones, desde ahí se aumenta el diámetro hasta sus medidas finales. Mediante la tensión superficial y el efecto elevador del campo de radiofrecuencia se sostiene la parte fundida.

**3. Métodos de Colada.** Con respecto a los métodos anteriores, este es de menor calidad debido a la duración. Con este método se crea el silicio multicristalino. Produce un material con alta densidad de grano, defectos en la estructura y dislocaciones que reduce su calidad electrónica. Fue producida a nivel mundial en un 35% en el año de 1999 en la tecnología de módulos fotovoltaicos. En el año de 1999 se utilizó esta tecnología para producir a nivel mundial los módulos fotovoltaicos. Está basado en depositar el polisilicio fundido dentro del molde de grafito junto al crisol de cuarzo; para

lograr la solidificación se controla el enfriamiento del crisol. No se puede evitar la interacción con el crisol y no se produce la separación de impurezas. Las dimensiones del silicio pueden llegar a ser de 60x60x20 (cm) y pesar 250kg, se separa del molde y corta en bloques de menor dimensión.

### **Tecnología de silicio policristalino.**

La producción de este material implica un costo más bajo, el cual puede crear fronteras de grano, defectos puntuales en la estructura y dislocaciones. (Ramos A. X., 2021) Estas celdas son producidas a través del método de colada. Son construidas desde diminutos granos cristalinos provenientes de múltiples fuentes en los que sus átomos se hallan dispuestos en direcciones aleatorias, seguidamente se fusionan en un crisol y se solidifican, sin embargo, esta técnica recoge gran cantidad de impurezas, por lo que su calidad es inferior a las del silicio monocristalino, ya que presenta numerosos fallos en sus bordes; no obstante, su fabricación es más económica. (Eraso et al., 2017) Para contrarrestar esta particularidad se han diseñado métodos para la refinación como la solidificación direccional, el método de intercambio de calor y el de empuje electromagnético continuo.

### **Tecnología de película delgada.**

En cuanto a las celdas solares que son de película delgada, (Lozada, 2012) expresa que:

Se conforman por capas que tienen diversos semiconductores que cuentan con grosores que oscilan entre 20nm y 5 $\mu$ m; la celda solar en su área activa presenta un espesor máximo entre 7 y 8 $\mu$ m; por ello reciben el nombre de celdas de película delgada. Este tipo de celda solar es fabricada de manera estratificada (el material crece encima del otro); constituida por dos contactos eléctricos, la ventana óptica y la capa absorbente que a su vez se conforma por un óxido conductor transparente y por la capa buffer. Estas celdas se fabrican

bajo el concepto llamado capa absorbente-ventana óptica, para reducir las pérdidas de corriente en celdas de tipo heterojuntura. (pág.85)

Así mismo, el autor describe los atributos más significativos de los componentes de la celda solar de película delgada, entre estos la ventana óptica, conformada por una capa llamada buffer y otra denominada TCO, cuyo objetivo es permitir que llegue a la capa absorbente la mayor cantidad de radiación solar posible; favoreciendo de esta forma la generación de un campo eléctrico potente en la ZCE del dispositivo; las capas buffer son una película delgada con un espesor aproximado entre 50nm y 80nm en su estructura y su propósito es optimizar la unión mecánica entre el contacto eléctrico superior y la capa absorbente.(Vallejo, 2012)

### **Tecnología de silicio amorfo.**

En su estudio “Modelo para la estimación de potencia eléctrica en módulos fotovoltaicos de tecnología basada en silicio” Eraso indica que la Tecnología de silicio amorfo se elabora teniendo como base, una película delgada de silicio amorfo que funciona como un material que absorbe con substratos de vidrio u algún material flexible, y no lo hace sobre obleas como sucede con el silicio monocristalino y policristalino. Una de las diferencias más relevantes de estas dos clases de materiales está en que los materiales de película delgada cuentan con una banda prohibida directa, dicho de otro modo, existe una alineación directa entre el tope superior de la banda de valencia y el tope inferior de la banda de conducción. (2018)

Para Males (2021) las celdas con base en el silicio amorfo “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.” (pág. 38) Este tipo células llegan a

generar un rendimiento cercano al Silicio cristalino si se mantiene una alta exposición de luz solar, ya que la absorción espectral tiene el comportamiento de un gap (diferencia energética entre la banda de valencia y la banda de conducción) indirecta de 1,7 eV a pesar de tener un gap directo.

### **Tecnologías con base en materiales orgánicos.**

Ese tipo de celda basa su material semiconductor en cadenas de carbono hibridizado en forma  $sp^2$  con estructura hexagonal y presenta un rendimiento de 18,2%; con un mecanismo de separación de cargas diferente, debido a que genera una excitación por la absorción de luz; para generar los portadores de carga el electrón-hueco deberá ser separado. Para romper la simetría del dispositivo es necesario crear un campo eléctrico mediante la influencia de electrodos. (Males. 2021) Algunas de las ventajas de este tipo de tecnologías son:

1. La capacidad de ser depositadas en grandes áreas sobre diferentes materiales.
2. Permite formar películas delgadas bien definidas y sublimar moléculas orgánicas por las bajas temperaturas en las técnicas de producción.
3. A diferencia de los materiales cristalinos la ausencia de una red definida hace que las impurezas generen pocos efectos sobre el material.
4. Se requiere bajas longitudes de absorción óptica para la banda directa del material, que permite a una celda de grosor de 100 a 200 nm un alto coeficiente de absorción; logrando obtener una completa absorción de energía necesaria para lograr el estado de excitación, que genere un impacto positivo en el peso de la celda.

Una tecnología prometedora para la producción de celdas fotovoltaicas, con características que permiten formar estructuras que se adaptan a diferentes dispositivos.

(Credgington, 2014, como se citó en Males, 2021)

### **Celdas solares de Perovskita.**

La perovskita es un material que está tomando importancia en la industria de dispositivos solares debido a sus propiedades optoelectrónicas (Amplio espectro de absorción, baja tasa de recombinación, elevado coeficiente de absorción, baja concentración de defectos, una alta tolerancia a los mismos y alta movilidad intrínseca de portadores libres) y la absorción de luz y sus beneficiosas propiedades electrónicas (extensas longitudes de expansión y baja energía excitónica), de esta forma, las celdas solares de este material han evolucionado como una de las tecnologías más promisorias de los últimos años, llegando incluso a superar el 3.8% de eficiencia que tenía la primera celda de perovskita producida en el 2009, hasta alcanzar 22.7% de eficiencia en el año 2018, ajustándose a los estándares de otras tecnologías fotovoltaicas. (Ramos S. , 2018)

Pese a las características positivas de la perovskita como material fotovoltaico, su aplicación en celdas solares implica usar contactos selectivos que hacen posible la separación de las caras, estos son contactos selectivos de electrones (ESL) y otro con huecos (HSL) lo que constituye un complejo dispositivo solar cuyo funcionamiento se da por interfaces entre materiales semiconductores. (Ramos S. , 2018)

### 5. RESULTADOS

TECNOLOGIAS				
	Monocrystalino	Policristalino	Amorfo	Perovskita
<b>Ventajas</b>	<p>Mejor eficiencia y rendimiento en los mercados actuales de tecnología en paneles solares. Tienen mayor rentabilidad a mediano y largo debido a que tienen más rendimiento, eficiencia de panel superior al 19-20%, permiten distribuir de mejor manera el espacio que dispone el tejado, que por lo general es limitado. Las células de silicio que los componen proceden de un único cristal, presentando una pureza óptima que mejora la eficiencia. - Al menos duran 25 años (larga vida útil) - Poseen los mejores Coeficientes de Temperatura por lo que son adecuados para climas cálidos - Adecuados para autoconsumo -potencias que</p>	<p>Bajo costo - al menos duran 25 años (larga vida útil) - adecuados para auto consumo - potencias que suelen oscilar entre los 280W y 340W - rendimiento aproximado (20.8%) - la materia prima (SiO<sub>2</sub>) es abundante en la corteza terrestre.</p>	<p>Son de fabricación rápida y necesitan menos materia prima. Bajo coste de energía y brinda facilidad para la creación de módulos más flexibles. Adecuadas para uso en interiores. Amplio rango de tensiones (pocos voltios a decenas de voltios) - la materia prima (SiO<sub>2</sub>) es abundante en la corteza terrestre.</p>	<p>Disminución en el coste de los paneles solares. Son de fácil fabricación. El mineral base posee propiedades estructurales y electrónicas que los hacen más eficaces al momento de absorber ondas de luz verdes, azuladas y ultravioletas. No requiere un proceso de cristalización (altas temperaturas) por lo que reduce el gasto energético. - eficiencia y estabilidad alta - aumenta la eficiencia de conversión al combinarse con silicio - La perovskitas prometen reducir el 80 por ciento el coste de fabricación de los actuales paneles solares - futuro tecnológico prometedor - se fabrican a temperaturas inferiores a</p>

	<p>suelen oscilar entre los 300W y los 400W - mayor uniformidad en la estructura cristalina de silicio - mayor eficiencia cuántica - Rendimiento aproximado 25% - la materia prima (SiO<sub>2</sub>) es abundante en la corteza terrestre.</p>			<p>los 200°C – son flexibles y transparentes y se pueden «pintar» sobre cualquier material, plástico, cristal, un folio. - Es un material compatible con el silicio.</p>
--	--	--	--	--

<p><b>Desventajas</b></p>	<p>Inversión inicial alta - se fabrican a temperaturas superiores a los 1000°C - altos costes energéticos y de fabricación</p>	<p>Menor eficiencia y rendimiento - Reduce la potencia que puede instalarse en los tejados y requiere mayor superficie -Al proceder de muchos cristales de silicio fundidos en conjunto, las células de silicio que componen estas celdas tienen menos pureza, por lo que su eficiencia y rendimiento son siempre inferiores - se fabrican a temperaturas superiores a los 1000°C</p>	<p>Son los de menor implementación en el mundo - El silicio que las componen es de baja calidad - Eficiencia y rendimiento menor que las tecnologías basadas en silicio cristalino. - Rendimiento aproximado (13.4%) - no posee estructura cristalina</p>	<p>Son de corta vida útil - Desarrollo investigativo reciente - Materia prima (CaTiO3) mineral escaso en la tierra. Las perovskitas se descomponen cuando están en contacto con la atmósfera, lo que significa simplemente que tienen que ser sellados. Aún no es posible evaluar la estabilidad a largo plazo.</p>
<p><b>Eficiencia</b></p>	<p>25 (eficiencia energética (15 al 21%),)</p>	<p>16 - 20.8 %</p>	<p>6 - 13.4%</p>	<p>1 5%</p>

## 6. CONCLUSIONES

- La ubicación geográfica de Colombia le proporciona ventajas frente al desarrollo de proyectos que busquen obtener energía a través de métodos más limpios y sostenibles, que mantengan una relación más armoniosa con el medio ambiente y minimicen los daños generados a este. La energía solar es una fuente de energía gratuita, renovable y limpia que hace posible que pueda suplirse la demanda del servicio de energía de manera más integral, facilitando su acceso a poblaciones rurales privadas de este. Si bien en los últimos años se ha avanzado en la materialización de estas iniciativas, es urgente potenciar este accionar en todos los departamentos y municipios del país, en las diferentes empresas y sectores, tanto privados como de carácter público, esto teniendo en cuenta la situación actual del planeta en temas relacionados con el cambio climático, calentamiento global, contaminación y escasez de recursos naturales no renovables que deviene en el deterioro del ecosistema.
- En materia de tecnologías para la creación de las celdas encargadas de captar y transformar la radiación solar en energía, las que se crean a partir del silicio continúan siendo predominantes en la industria de la energía solar fotovoltaica, esto debido a que siguen brindando mayor estabilidad a causa de la pureza del material, lo que hace más uniforme la estructura y se refleja en mejores niveles 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  $I_{sc}$  la irradiancia espectral incidente” (Ramos A. X., 2021)(Ramos, 2021) Existen factores que pueden influir en la eficiencia de estas celdas como la arquitectura: en la actualidad el mercado cuenta con celdas de unión simple, de doble unión y de hetero unión cuyos rendimientos son variados; la temperatura también puede ser un factor externo que afecte la eficacia de los sistemas fotovoltaicos. Cabe mencionar que el óxido de silicio (mineral cuarzo) es un mineral muy abundante en la

corteza terrestre por lo que las actividades de extracción de la materia prima son relativamente sencillas en términos de exploración y explotación.

- El constante trabajo de investigación y los adelantos tecnológicos para mejorar la eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos reduciendo costos de fabricación, han llevado al descubrimiento de nuevos materiales que alcanzan altos rendimientos en los sistemas fotovoltaicos, un ejemplo de ello es la perovskita, que cuenta con propiedades y características particulares que la hacen ser una alternativa prometedora en la utilización provechosa de la energía solar, que, conforme a Rull, “prometen reducir el 80 por ciento el coste de fabricación de los actuales paneles solares, el 85 por ciento de los cuales funcionan en todo el mundo gracias al silicio cristalino.” No obstante, su uso también implica dificultades, una de ellas es que son minerales raros en la corteza terrestre, lo que trae consigo grandes retos en la fase de exploración y explotación de estos yacimientos; también existe incertidumbre frente a la resistencia de las celdas fotovoltaicas debido a que es muy reciente su desarrollo investigativo.

## 7. RECOMENDACIONES

- En Colombia se debe realizar un esfuerzo coordinado entre los gobiernos locales, departamentales, Nacionales, las instituciones gubernamentales, la academia y las industrias del sector energético con el fin de potenciar los métodos o sistemas de energías limpias, sustentables y sostenibles con el medio ambiente. En este sentido se deben desarrollar jornadas pedagógicas de difusión acerca del conocimiento sobre la energía solar fotovoltaica, el contexto actual a nivel mundial y nacional de estas tecnologías, sus ventajas y beneficios, además de su importancia y su urgente implementación para acelerar avances industriales que son claves en la sociedad actual. Por otra parte, se deben estimular las propuestas investigativas que desarrollen estas tecnologías e implementar formas de compensación para quienes las usen.
- Sería oportuno fomentar programas de formación profesional en áreas que favorezcan la solución de los diversos problemas investigativos de estas tecnologías para que alcancen un adecuado desarrollo teniendo en cuenta las características del territorio colombiano.
- Promocionar el diseño, implementación y evaluación de macro proyectos que desarrollen la obtención de energías limpias, pudiendo ser esta la solución para poblaciones que no tienen acceso a este servicio básico.
- Se debe construir una línea base sólida que permita realizar una adecuada zonificación territorial que determine los mejores lugares en los que se puedan implementar estas tecnologías, teniendo en cuenta criterios internacionales. Una estrategia para esto sería ampliar la red de estaciones meteorológicas en función de conocer mejor el comportamiento de las variables a considerar para desarrollar estos proyectos energéticos.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agudelo Arias, H. D., Delgado Arroyo, L., & Aristizábal Cardona, A. J. (2016). Evaluación del potencial de generación fotovoltaica en la ciudad de Quibdó, Chocó.

<https://journal.poligran.edu.co/index.php/elementos/article/view/839> .

Aravena, J. C. (2009). LA ENERGIA SOLAR: TRANSFORMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR A SUS DIFERENTES APLICACIONES Y UTILIDADES.

<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2009/bmficio.83e/doc/bmficio.83e.pdf> .

Báez, J., & Forero, R. (2018). Energía solar fotovoltaica, una alternativa sustentable para el futuro.

<http://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/10713/2018Baezjose.pdf?sequence=1&isAllowed=y> .

CELSIA. (2021). <https://eficienciaenergetica.celsia.com/todo-lo-que-debes-saber-sobre-energia-solar-en-colombia/>.

Chacón Serna, D. F., Moreno Amaya, C. M., & Hernández Mora, A. (2016). *Centrales fotovoltaicas: contexto colombiano frente a latinoamérica continental de habla hispana*.

<https://journal.poligran.edu.co/index.php/elementos/article/view/817>.

EcoInventos. (2019). Diferencia entre paneles solares monocristalinos y policristalinos.

<https://ecoinventos.com/diferencia-paneles-solares-monocristalinos-policristalinos/> .

Eraso, F. J., Erazo, O. F., & Escobar, E. (2019). Modelo para la estimación de potencia eléctrica en módulos fotovoltaicos de tecnología basada en silicio. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 27 N° 2, 2019, pp. 188-196 , 189-190.

Escobar, C. C. (2021). Rol de la energía solar y eólica en la transición energética en Colombia: actualidad, perspectivas y retos.

<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/40173/ccortegatee.pdf?sequence=3&isAllowed=y> .

García, Á. F. (2010). Física con ordenador. <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/default.htm>

.

Gómez Ramirez, J., Murcia Murcia, J. D., & Cabeza Rojas, I. (2017). *LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN COLOMBIA: POTENCIALES, ANTECEDENTES Y PERSPECTIVAS*.  
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/10312/G%c3%b3mez2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Gómez-Ramírez, J., Murcia, & J., & Rojas, & I. (2018). *REPOSITORIO USTA.EDU*.  
Recuperado el 16 de Junio de 2021, de  
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/10312/G%C3%B3mez2018.pdf?s>

González Prado, J. (2018). *NUEVAS TECNOLOGÍAS EN EL DESARROLLO DE CELDAS SOLARES*.  
[https://revistas.urp.edu.pe/index.php/Perfiles\\_Ingenieria/article/view/2371/2416](https://revistas.urp.edu.pe/index.php/Perfiles_Ingenieria/article/view/2371/2416) .

Hernandez, J., Sáenz, E., & Vallejo, W. A. (2011). Estudio del recurso solar en la ciudad de Bogotá para el diseño de sistemas fotovoltaicos interconectados residenciales.  
<http://revcolfis.org/ojs/index.php/rcf/article/download/420221/82> .

IDEAM. (2014). *Atlas de Radiación solar en Colombia*.

Khan Academy. (s.f.). Efecto fotoeléctrico. <https://es.khanacademy.org/science/ap-chemistry/electronic-structure-of-atoms-ap/bohr-model-hydrogen-ap/a/photoelectric-effect> .

Lozada, W. A. (2012). Síntesis de capas buffer para celdas solares de película delgada.  
<file:///D:/Tecnoradius/Downloads/Dialnet-SintesisDeCapasBuerParaCeldasSolaresDePeliculaDelg-5085367.pdf> .

Maricar, N. M., Lee, E., Lim, H. K., Sepikit, M. F., Maskum, M. R., Ahmad, M. F., y otros. (2003). Descripción general de la tecnología de energía solar fotovoltaica para el escenario de Malasia. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1437462>.

Matsumoto, Y. (2010). Celdas solares de silicio: fundamento y tendencia.  
<http://dci.uqroo.mx/RevistaCaos/2011/3-RCC-11-YMK.pdf> .

Minenergía. (2021). <https://www.minenergia.gov.co/energias-renovables-no-convencionales> .

Ramos, A. X. (2021). Análisis comparativo de las principales tecnologías de la energía solar fotovoltaica.

<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/40460/axmalesr.pdf?sequence=1&isAllowed=y> .

Ramos, S. (2018). Fabricación y caracterización de celdas fotovoltaicas de perovskita de nueva composición.

<https://www.upo.es/cms1/export/sites/upo/investiga/ccs/documentos/TFM-Susana-Ramos-Terron.pdf> .

UPME. (2015). *Plan Energético Nacional - Colombia: Ideario Energético 2050*.

[https://www1.upme.gov.co/Energia\\_electrica/Planes-expansion/Plan-Expansion-2015-2029/Plan\\_GT\\_2015-2029\\_VF\\_22-12-2015.pdf](https://www1.upme.gov.co/Energia_electrica/Planes-expansion/Plan-Expansion-2015-2029/Plan_GT_2015-2029_VF_22-12-2015.pdf).

UPME. (2020). *Plan Energético Nacional 2020-2050*.

<https://www1.upme.gov.co/Paginas/Plan-Energetico-Nacional-2050.aspx>.

## 9. ANEXOS

### Anexo A.

#### DATOS PVGIS LA

IRRADIACIÓN HORIZONTAL			
MES	DIAS	Promedio Mes (kWh/m <sup>2</sup> )	HSP/día
Ene	31	177.77	5.73
Feb	28.25	172.97	6.12
Mar	31	196.37	6.33
Abr	30	187.26	6.24
May	31	186.02	6.00
Jun	30	190.34	6.34
Jul	31	204.53	6.60
Ago	31	199.98	6.45
Sep	30	176.69	5.89
Oct	31	169.40	5.46
Nov	30	153.70	5.12
Dic	31	161.89	5.22

IRRADIACIÓN DIRECTA			
MES	DIAS	Promedio Mes (kWh/m <sup>2</sup> )	HSP/día
Ene	31	218.94	7.06
Feb	28.25	191.59	6.78
Mar	31	185.27	5.98
Abr	30	146.90	4.90
May	31	145.38	4.69
Jun	30	166.02	5.53
Jul	31	189.35	6.11
Ago	31	179.25	5.78
Sep	30	155.86	5.20
Oct	31	148.14	4.78
Nov	30	157.32	5.24
Dic	31	189.02	6.10

#### DATOS PVGIS BARRANQUILLA

IRRADIACIÓN HORIZONTAL			
MES	DIAS	Promedio Mes (kWh/m <sup>2</sup> )	HSP/día
Ene	31	187.67	6.05
Feb	28.25	184.60	6.53
Mar	31	207.08	6.68
Abr	30	192.35	6.41
May	31	183.24	5.91
Jun	30	179.09	5.97
Jul	31	194.51	6.27
Ago	31	185.26	5.98
Sep	30	169.55	5.65
Oct	31	161.33	5.20
Nov	30	153.22	5.11
Dic	31	172.48	5.56

IRRADIACIÓN DIRECTA			
MES	DIAS	Promedio Mes (kWh/m <sup>2</sup> )	HSP/día
Ene	31	214.57	6.92
Feb	28.25	201.16	7.12
Mar	31	212.56	6.86
Abr	30	187.48	6.25
May	31	171.87	5.54
Jun	30	164.46	5.48
Jul	31	179.67	5.80
Ago	31	177.34	5.72
Sep	30	169.78	5.66
Oct	31	169.37	5.46
Nov	30	169.66	5.66
Dic	31	198.99	6.42

**DATOS PVGIS BOGOTÁ**

IRRADIACIÓN HORIZONTAL			
MES	DIAS	Promedio Mes (kWh/m2)	HSP/día
Ene	31	151.58	4.89
Feb	28.25	134.79	4.77
Mar	31	132.95	4.29
Abr	30	123.09	4.10
May	31	135.80	4.38
Jun	30	139.72	4.66
Jul	31	147.06	4.74
Ago	31	143.34	4.62
Sep	30	136.21	4.54
Oct	31	134.87	4.35
Nov	30	121.19	4.04
Dic	31	140.77	4.54

IRRADIACIÓN DIRECTA			
MES	DIAS	Promedio Mes (kWh/m2)	HSP/día
Ene	31	135.97	4.39
Feb	28.25	100.20	3.55
Mar	31	75.44	2.43
Abr	30	64.13	2.14
May	31	81.95	2.64
Jun	30	98.41	3.28
Jul	31	106.11	3.42
Ago	31	91.13	2.94
Sep	30	87.01	2.90
Oct	31	85.42	2.76
Nov	30	77.92	2.60
Dic	31	119.46	3.85

**DATOS PVGIS ARAUCA**

IRRADIACIÓN HORIZONTAL			
MES	DIAS	Promedio Mes (kWh/m2)	HSP/día
Ene	31	172.12	5.55
Feb	28.25	162.27	5.74
Mar	31	166.60	5.37
Abr	30	149.10	4.97
May	31	153.56	4.95
Jun	30	137.34	4.58
Jul	31	143.35	4.62
Ago	31	152.85	4.93
Sep	30	155.20	5.17
Oct	31	166.38	5.37
Nov	30	154.61	5.15
Dic	31	167.50	5.40

IRRADIACIÓN DIRECTA			
MES	DIAS	Promedio Mes (kWh/m2)	HSP/día
Ene	31	185.31	5.98
Feb	28.25	154.20	5.46
Mar	31	124.62	4.02
Abr	30	94.84	3.16
May	31	106.15	3.42
Jun	30	93.99	3.13
Jul	31	99.28	3.20
Ago	31	107.86	3.48
Sep	30	120.02	4.00
Oct	31	134.87	4.35
Nov	30	143.66	4.79
Dic	31	180.52	5.82

**DATOS PVGIS CHOCÓ**

IRRADIACIÓN HORIZONTAL			
MES	DIAS	Promedio Mes (kWh/m <sup>2</sup> )	HSP/día
Ene	31	109.41	3.53
Feb	28.25	106.18	3.76
Mar	31	123.10	3.97
Abr	30	125.27	4.18
May	31	128.94	4.16
Jun	30	126.92	4.23
Jul	31	138.84	4.48
Ago	31	140.03	4.52
Sep	30	126.98	4.23
Oct	31	126.49	4.08
Nov	30	112.80	3.76
Dic	31	107.79	3.48

IRRADIACIÓN DIRECTA			
MES	DIAS	Promedio Mes (kWh/m <sup>2</sup> )	HSP/día
Ene	31	58.44	1.89
Feb	28.25	53.20	1.88
Mar	31	54.27	1.75
Abr	30	58.41	1.95
May	31	58.29	1.88
Jun	30	63.25	2.11
Jul	31	73.68	2.38
Ago	31	74.53	2.40
Sep	30	62.06	2.07
Oct	31	62.58	2.02
Nov	30	59.81	1.99
Dic	31	57.34	1.85

**DATOS PVGIS CAQUETÁ**

IRRADIACIÓN HORIZONTAL			
MES	DIAS	Promedio Mes (kWh/m <sup>2</sup> )	HSP/día
Ene	31	158.37	5.11
Feb	28.25	141.61	5.01
Mar	31	143.36	4.62
Abr	30	136.72	4.56
May	31	130.29	4.20
Jun	30	122.75	4.09
Jul	31	134.12	4.33
Ago	31	140.05	4.52
Sep	30	151.13	5.04
Oct	31	157.81	5.09
Nov	30	148.99	4.97
Dic	31	157.77	5.09

IRRADIACIÓN DIRECTA			
MES	DIAS	Promedio Mes (kWh/m <sup>2</sup> )	HSP/día
Ene	31	131.79	4.25
Feb	28.25	98.99	3.50
Mar	31	85.02	2.74
Abr	30	86.77	2.89
May	31	84.59	2.73
Jun	30	85.26	2.84
Jul	31	99.90	3.22
Ago	31	94.64	3.05
Sep	30	111.56	3.72
Oct	31	113.88	3.67
Nov	30	114.34	3.81
Dic	31	138.18	4.46

**DATOS PVGIS LETICIA**

ELABORADO POR: Oficina de Investigaciones

REVISADO POR: Soporte al Sistema Integrado de Gestión UTS

APROBADO POR: jefe Oficina de Investigación  
FECHA APROBACION:

IRRADIACIÓN HORIZONTAL			
MES	DIAS	Promedio Mes (kWh/m2)	HSP/día
Ene	31	140.75	4.54
Feb	28.25	125.83	4.45
Mar	31	145.89	4.71
Abr	30	141.17	4.71
May	31	137.49	4.44
Jun	30	135.53	4.52
Jul	31	148.12	4.78
Ago	31	163.84	5.29
Sep	30	162.35	5.41
Oct	31	162.25	5.23
Nov	30	152.74	5.09
Dic	31	144.63	4.67

IRRADIACIÓN DIRECTA			
MES	DIAS	Promedio Mes (kWh/m2)	HSP/día
Ene	31	89.13	2.88
Feb	28.25	67.04	2.37
Mar	31	90.58	2.92
Abr	30	102.29	3.41
May	31	113.09	3.65
Jun	30	129.80	4.33
Jul	31	141.46	4.56
Ago	31	138.94	4.48
Sep	30	126.10	4.20
Oct	31	108.66	3.51
Nov	30	105.05	3.50
Dic	31	99.25	3.20

DATOS PVGIS PUTUMAYO

IRRADIACIÓN HORIZONTAL			
MES	DIAS	Promedio Mes (kWh/m2)	HSP/día
Ene	31	154.59	4.99
Feb	28.25	133.70	4.73
Mar	31	135.91	4.38
Abr	30	128.84	4.29
May	31	127.26	4.11
Jun	30	115.47	3.85
Jul	31	123.60	3.99
Ago	31	137.94	4.45
Sep	30	146.37	4.88
Oct	31	156.96	5.06
Nov	30	150.91	5.03
Dic	31	154.91	5.00

IRRADIACIÓN DIRECTA			
MES	DIAS	Promedio Mes (kWh/m2)	HSP/día
Ene	31	122.81	3.96
Feb	28.25	88.90	3.15
Mar	31	79.13	2.55
Abr	30	79.93	2.66
May	31	85.37	2.75
Jun	30	80.92	2.70
Jul	31	83.97	2.71
Ago	31	93.87	3.03
Sep	30	107.68	3.59
Oct	31	115.16	3.71
Nov	30	118.87	3.96
Dic	31	129.64	4.18

DATOS PVGIS SAN ANDRES ISLA

IRRADIACIÓN HORIZONTAL			
MES	DIAS	Promedio Mes (kWh/m2)	HSP/día
Ene	31	156.54	5.05
Feb	28.25	165.06	5.84
Mar	31	200.90	6.48
Abr	30	193.32	6.44
May	31	179.13	5.78
Jun	30	156.23	5.21
Jul	31	166.89	5.38
Ago	31	170.92	5.51
Sep	30	146.98	4.90
Oct	31	144.27	4.65
Nov	30	129.07	4.30
Dic	31	146.08	4.71

IRRADIACIÓN DIRECTA			
MES	DIAS	Promedio Mes (kWh/m2)	HSP/día
Ene	31	172.73	5.57
Feb	28.25	173.65	6.15
Mar	31	202.40	6.53
Abr	30	166.83	5.56
May	31	128.44	4.14
Jun	30	96.68	3.22
Jul	31	105.43	3.40
Ago	31	116.70	3.76
Sep	30	100.73	3.36
Oct	31	110.10	3.55
Nov	30	113.84	3.79
Dic	31	157.53	5.08

**IRRADIACIÓN HORIZONTAL** Es la radiación procedente del sol medida sobre una superficie horizontal, es uno de los parámetros importantes para evaluar el potencial de energía solar en una región.

**IRRADIACIÓN DIRECTA:** La radiación solar que llega sin cambios de dirección a la superficie del planeta.