

**Análisis a estrategias de optimización energética en sistemas de energía solar fotovoltaica
para aplicaciones residenciales: Un enfoque comparativo**

Willen Johan Niño Sierra

Asesor

Jorge Orlando Bareño Quintero

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela De Ciencias Básicas, Tecnología e Ingenierías ECBTI

Ingeniería Electrónica

2025

Resumen

El documento realiza un análisis integral sobre las estrategias de optimización energética aplicadas a sistemas de energía solar fotovoltaica en entornos residenciales, abordando tanto los avances tecnológicos como los desafíos asociados. Se enfoca en cómo estas soluciones pueden ser adaptadas a las condiciones específicas de regiones como Bogotá y la costa colombiana, con sus características climáticas particulares.

En primer lugar, se hace una revisión de los principales materiales fotovoltaicos disponibles en el mercado, incluyendo células de silicio monocristalino, policristalino y de película delgada, destacando sus ventajas, limitaciones y aplicaciones en contextos específicos. Asimismo, se exploran tecnologías emergentes como las células perovskitas y multijuntura. Estas últimas, aunque ofrecen un notable potencial para captar una mayor parte del espectro solar y mejorar significativamente la eficiencia energética, enfrentan retos relacionados con su estabilidad, durabilidad y costos de fabricación.

El texto subraya la importancia de las tecnologías de refrigeración para mitigar los efectos del sobrecalentamiento en los paneles solares, un desafío especialmente crítico en regiones cálidas como la costa colombiana. Se analizan sistemas de refrigeración activos y pasivos, como enfriamiento por líquido, aire y recubrimientos reflectantes, que contribuyen a mantener las temperaturas operativas dentro de rangos óptimos, incrementando así la eficiencia y prolongando la vida útil de los paneles.

Otro elemento clave del análisis es la incorporación de sistemas de seguimiento solar, que ajustan automáticamente la orientación de los paneles para maximizar la captación de luz a lo largo del día. Estos sistemas permiten aumentar la eficiencia energética entre un 20% y un 30% en comparación con instalaciones fijas. Sin embargo, su implementación sigue estando limitada

por los elevados costos iniciales y la necesidad de mantenimiento especializado, lo que plantea un desafío para su adopción en aplicaciones residenciales.

Desde una perspectiva regional, se examina el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos en Bogotá y la costa colombiana, considerando las condiciones climáticas específicas de cada lugar. En Bogotá, caracterizada por un clima templado, baja irradiancia directa y alta proporción de luz difusa, los paneles de silicio monocristalino ofrecen un desempeño superior gracias a su eficiencia en estas condiciones. Por otro lado, en la costa colombiana, donde las altas temperaturas y la intensa irradiancia solar son predominantes, se requiere un enfoque combinado que incluya tecnologías de refrigeración y materiales con bajos coeficientes térmicos para maximizar la eficiencia energética y mitigar los efectos adversos del calor.

El documento también compara y analiza las tecnologías fotovoltaicas actuales, destacando cómo cada una puede ser utilizada para abordar diferentes desafíos. Los paneles monocristalinos, por ejemplo, ofrecen la mayor eficiencia y son ideales para áreas con limitaciones de espacio, aunque a un costo más elevado. Los paneles policristalinos son una opción más económica, aunque menos eficiente, mientras que los paneles de película delgada destacan por su flexibilidad y bajo costo, aunque tienen una vida útil más corta y menor eficiencia.

Se resalta la importancia de la innovación en materiales y diseño para mejorar el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos. Avances como células bifaciales, estructuras híbridas y encapsulados resistentes están permitiendo una mayor adaptabilidad a diversos contextos geográficos y climáticos. Además, se menciona el papel de las tecnologías de automatización y control dinámico para optimizar el funcionamiento de los sistemas solares, especialmente en aplicaciones residenciales.

El estudio subraya que, a pesar de los avances logrados, es esencial continuar innovando en el desarrollo de materiales y sistemas para superar las limitaciones climáticas, tecnológicas y económicas que afectan la adopción masiva de la energía solar en Colombia. La integración de tecnologías avanzadas, junto con un enfoque adaptado a las condiciones específicas de cada región, es fundamental para fomentar la transición hacia un modelo energético sostenible que sea viable y accesible en el contexto residencial colombiano. La selección óptima de tecnología fotovoltaica en Colombia depende de las condiciones climáticas locales, donde los paneles monocristalinos destacan por su eficiencia y estabilidad térmica tanto en Bogotá como en la costa, mientras que los policristalinos pueden ser una alternativa en proyectos con restricciones presupuestarias, siempre considerando estrategias de optimización adaptadas a cada entorno.

Económicamente, tanto las tecnologías de silicio monocristalino como las de silicio policristalino resultan viables para las condiciones evaluadas en Bogotá y la zona costera colombiana. No obstante, se recomienda el uso de paneles monocristalinos en Bogotá debido a su mayor eficiencia en condiciones de irradiancia variable y espacio limitado. En la costa colombiana, si bien los paneles policristalinos pueden funcionar adecuadamente gracias a su buen desempeño térmico y menor costo, se recomienda también el uso de paneles monocristalinos complementados con un sistema de refrigeración activa para contrarrestar las pérdidas por sobrecalentamiento. Esta medida es indispensable en zonas de alta temperatura para mantener la eficiencia energética y asegurar un retorno de inversión favorable. La implementación de tecnologías de enfriamiento activa, si bien representa un gasto adicional, es viable técnica y económicamente, considerando el aumento en la producción energética que garantiza la sostenibilidad del sistema en condiciones climáticas adversas.

Palabras clave: Energía, fotovoltaica, optimización y eficiencia.

ABSTRAC

The document provides a comprehensive analysis of energy optimization strategies applied to solar photovoltaic systems in residential environments, addressing both technological advances and associated challenges. It focuses on how these solutions can be adapted to the specific conditions of regions such as Bogotá and the Colombian coast, with their particular climatic characteristics.

First, it reviews the main photovoltaic materials available on the market, including monocrystalline, polycrystalline, and thin-film silicon cells, highlighting their advantages, limitations, and applications in specific contexts. Emerging technologies such as perovskite and multijunction cells are also explored. The latter, while offering significant potential to capture a larger portion of the solar spectrum and significantly improve energy efficiency, face challenges related to their stability, durability, and manufacturing costs.

The text emphasizes the importance of cooling technologies to mitigate the effects of overheating on solar panels, a particularly critical challenge in hot regions such as the Colombian coast. Active and passive cooling systems, such as liquid cooling, air cooling, and reflective coatings, are analyzed. These contribute to maintaining operating temperatures within optimal ranges, thus increasing efficiency and extending the lifespan of the panels.

Another key element of the analysis is the incorporation of solar tracking systems, which automatically adjust panel orientation to maximize light capture throughout the day. These systems allow for energy efficiency increases of 20% to 30% compared to fixed installations. However, their implementation remains limited by high initial costs and the need for specialized maintenance, posing a challenge for their adoption in residential applications.

From a regional perspective, the performance of photovoltaic systems in Bogotá and the Colombian coast is examined, considering the specific climatic conditions of each location. In Bogotá, characterized by a temperate climate, low direct irradiance, and a high proportion of scattered light, monocrystalline silicon panels offer superior performance thanks to their efficiency under these conditions. On the other hand, on the Colombian coast, where high temperatures and intense solar irradiance are prevalent, a combined approach is required that includes cooling technologies and materials with low thermal coefficients to maximize energy efficiency and mitigate the adverse effects of heat.

The document also compares and analyzes current photovoltaic technologies, highlighting how each can be used to address different challenges. Monocrystalline panels, for example, offer the highest efficiency and are ideal for space-constrained areas, albeit at a higher cost. Polycrystalline panels are a more economical, though less efficient, option, while thin-film panels stand out for their flexibility and low cost, although they have a shorter lifespan and lower efficiency.

The importance of innovation in materials and design to improve the performance of photovoltaic systems is highlighted. Advances such as bifacial cells, hybrid structures, and robust encapsulations are enabling greater adaptability to diverse geographic and climatic contexts. Furthermore, the role of automation and dynamic control technologies in optimizing the operation of solar systems, especially in residential applications, is mentioned. The study emphasizes that, despite the progress made, continued innovation in the development of materials and systems is essential to overcome the climatic, technological, and economic limitations that affect the widespread adoption of solar energy in Colombia. The integration of advanced technologies, along with an approach tailored to the specific conditions of each region,

is essential to foster the transition to a sustainable energy model that is viable and accessible in the Colombian residential context. The optimal selection of photovoltaic technology in Colombia depends on local climatic conditions. Monocrystalline panels stand out for their efficiency and thermal stability both in Bogotá and on the coast, while polycrystalline panels can be an alternative in projects with budgetary restrictions, always considering optimization strategies tailored to each environment.

Economically, both monocrystalline silicon and polycrystalline silicon technologies are viable for the conditions evaluated in Bogotá and the Colombian coastal area. However, the use of monocrystalline panels is recommended in Bogotá due to their greater efficiency in conditions of variable irradiance and limited space. On the Colombian coast, while polycrystalline panels can function adequately thanks to their good thermal performance and lower cost, the use of monocrystalline panels, complemented by an active cooling system, is also recommended to counteract losses due to overheating. This measure is essential in high-temperature areas to maintain energy efficiency and ensure a favorable return on investment. The implementation of active cooling technologies, although representing an additional expense, is technically and economically feasible, considering the increase in energy production that guarantees the sustainability of the system in adverse climatic conditions.

Keywords: Energy, photovoltaics, optimization and efficiency.

Contenido

Introducción	12
Planteamiento del Problema	15
Justificación	17
Objetivos	20
Objetivo General	20
Objetivos Especifico	20
Desarrollo del Trabajo: Innovaciones en Materiales Fotovoltaicos	21
Sistemas de Refrigeración.....	27
Optimización Operativa: Refrigeración y Control Climático en Paneles Solares.....	28
Impacto de la Temperatura en la Eficiencia de los Paneles Fotovoltaicos	32
Sistemas de Seguimiento Solar y Modelos Dinámicos en Paneles Solares.....	35
Innovaciones en el Diseño de Células y Paneles Solares.....	43
Avances en Técnicas Basadas en Espejos y Concentradores	49
Beneficios y Desafíos	49
Técnicas Basadas en Espejos y Concentradores.....	50
Tecnologías Fotovoltaicas Disponibles en los Mercados	52
Silicio Monocristalino (Mono-Si)	52
Silicio Policristalino (Poly-Si).....	55
Células Fotovoltaicas de Película Delgada.....	57
Comparación de las Tecnologías Disponibles en el Mercado.....	59

Discusión.....	67
Aplicaciones Residenciales en Bogotá	67
Desempeño en Bogotá Enfocado a la Temperatura	68
Clima e Irradiancia Solar en Bogotá.....	68
Desempeño de los Paneles Solares en Bogotá	69
Impacto del Clima de Bogotá en el Rendimiento de los Paneles.....	71
Evaluación del Impacto de los Sistemas Solares en Bogotá	72
Sistemas de Refrigeración en Bogotá	73
Aplicaciones Residenciales en la Costa Colombiana.....	74
Desempeño en la Costa Colombiana Enfocado a la Temperatura	75
Clima y Condiciones en la Costa Colombiana.....	75
Desempeño de los Paneles Solares en la Costa.....	76
Impacto del Calor y Necesidad de Sistemas de Refrigeración.....	78
Evaluación del Impacto de los Sistemas Solares en la Costa Colombiana.....	79
Costo Energético de los Sistemas de Refrigeración Activa	80
Comparación de Paneles Solares en Bogotá y la Costa Colombiana.....	81
Caso de Estudio	83
Conclusiones	91
Recomendaciones Para Futuras Investigaciones	94
Referencias Bibliográficas	95

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Parámetros del Modelo Fotovoltaico para Diferentes Condiciones Climáticas</i>	30
Tabla 2 <i>Efectividad de Diferentes Métodos de Refrigeración</i>	31
Tabla 3 <i>Coefficientes de Temperatura y Eficiencias de Paneles Solares</i>	32
Tabla 4 <i>Parámetros del Modelo Fotovoltaico para Diferentes Condiciones Climáticas</i>	39
Tabla 5 <i>Rendimiento de Sistemas Con y Sin Seguimiento Solar</i>	40
Tabla 6 <i>Efecto Combinado del Seguimiento Solar y la Refrigeración Activa</i>	41
Tabla 7 <i>Valores Típicos de Parámetros Para Células de Silicio</i>	45
Tabla 8 <i>Comparación de Eficiencias de Diferentes Tipos de Células Solares</i>	49
Tabla 9 <i>Ventajas y Desventajas de Silicio Monocristalino</i>	54
Tabla 10 <i>Ventajas y Desventajas de Silicio Policristalino</i>	56
Tabla 11 <i>Ventajas y Desventajas de Células Fotovoltaicas de Película Delgada</i>	58
Tabla 12 <i>Comparación de las Tecnologías de Paneles Solares</i>	60
Tabla 13 <i>Parámetros Generales de Bogotá</i>	72
Tabla 14 <i>Costos Instalación y Mantenimiento en Bogotá</i>	73
Tabla 15 <i>Parámetros Generales de la Costa Colombiana</i>	79
Tabla 16 <i>Costos de Instalación y Mantenimiento en la Costa Colombiana</i>	79
Tabla 17 <i>Comparación de Paneles Solares en Bogotá y la Costa Colombiana</i>	81
Tabla 18 <i>Comparación de Dato de Estudio</i>	86
Tabla 19 <i>Variables Financieras</i>	89
Tabla 20 <i>Análisis Financiero Comparativo</i>	89

Tabla de Figuras

Figura 1 <i>Capacidad de Generación Eléctrica de Estados Unidos (2010-2023)</i>	22
Figura 2 <i>Panel Fotovoltaico</i>	25
Figura 3 <i>Eficiencia Relativa de Captación de Energía</i>	37

Introducción

La metodología empleada en este estudio es sistemática y rigurosa, orientada a realizar una revisión documental exhaustiva sobre tecnologías fotovoltaicas. Se recopilaron fuentes clave en bases de datos académicas como IEEE Xplore y ScienceDirect, así como informes de organizaciones reconocidas como la Agencia Internacional de Energía (IEA) y la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA). Este enfoque garantiza el acceso a literatura relevante y actualizada, permitiendo identificar avances tecnológicos y brechas en la investigación.

El estudio es exploratorio y descriptivo, enfocado en publicaciones recientes de los últimos diez años. Se analizaron tecnologías fotovoltaicas como células monocristalinas, policristalinas y de película delgada, evaluando su eficiencia, costos y aplicabilidad. La comparación se realizó cualitativa y cuantitativamente a partir de datos reportados en la literatura, sin recurrir a simulaciones. Los resultados se validaron mediante un análisis crítico de consistencia y precisión, y se presentan mediante tablas y gráficos que facilitan su comprensión.

La energía solar fotovoltaica ha experimentado avances significativos en diseño, materiales y técnicas operativas, contribuyendo a su posicionamiento como una fuente clave de energía renovable. Desde la integración de materiales avanzados, como las células perovskitas y células tandem, hasta el uso de técnicas innovadoras como espejos concentradores y sistemas de refrigeración activa y pasiva, cada innovación busca maximizar la eficiencia energética y reducir costos. Además, los sistemas de seguimiento solar permiten una captación de luz más eficiente al ajustar automáticamente la orientación de los paneles, mientras que los diseños híbridos combinan características de sistemas conectados y autónomos para mejorar la adaptabilidad en diferentes contextos. Estas mejoras están respaldadas por políticas gubernamentales y un

crecimiento sostenido del mercado, fomentando su implementación global y contribuyendo a la transición hacia un futuro energético más sostenible. Sin embargo, los desafíos persisten, especialmente en la optimización de materiales para climas extremos y en la reducción de costos de producción, áreas en las que la investigación continúa avanzando para garantizar un acceso más amplio y equitativo a esta tecnología transformadora.

En Colombia, la energía solar fotovoltaica ha crecido significativamente gracias a su marco regulatorio favorable y a su alta radiación solar, que oscila entre 4.5 y 6 kWh/m²/día, superando el promedio mundial. La capacidad instalada ha pasado de menos de 10 MW en 2015 a más de 200 MW en 2023, reflejando el interés en esta tecnología, impulsado también por la disminución de costos, que en el ámbito residencial se han reducido un 60% en la última década. Un sistema fotovoltaico en un hogar típico puede cubrir entre el 70% y el 90% de su consumo eléctrico, favoreciendo la adopción masiva de esta tecnología. Según la UPME, Colombia podría alcanzar entre 1.5 y 2 GW de capacidad instalada para 2030, consolidando la energía solar como una alternativa sostenible, económica y fundamental en la transición energética del país.

El documento aborda de manera integral el análisis de las estrategias de optimización energética en sistemas de energía solar fotovoltaica, estructurado en varias secciones clave. Comienza con un resumen que presenta el objetivo del trabajo, destacando los avances tecnológicos, desafíos y estrategias para optimizar sistemas fotovoltaicos en aplicaciones residenciales. La introducción contextualiza la importancia de la energía solar en la transición energética y los retos asociados a su implementación en el ámbito residencial. El planteamiento del problema define los principales desafíos en la adopción de tecnologías solares en Colombia, como la eficiencia limitada y los costos iniciales, formulando la pregunta central del análisis. La justificación resalta la necesidad de identificar configuraciones óptimas para mejorar la

viabilidad económica y técnica de los sistemas solares. Los objetivos detallan el propósito general del trabajo y los específicos, enfocados en la revisión bibliográfica, análisis de tecnologías y evaluación de sistemas. En el desarrollo del trabajo, se analizan avances en materiales fotovoltaicos, sistemas de refrigeración, seguimiento solar, innovaciones en diseño y tecnologías emergentes disponibles en el mercado. La discusión examina el desempeño de los sistemas fotovoltaicos en diversas regiones de Colombia, considerando factores climáticos y operativos. Finalmente, las conclusiones resumen los hallazgos clave y ofrecen recomendaciones para la implementación de tecnologías optimizadas en aplicaciones residenciales, respaldadas por las referencias bibliográficas consultadas para garantizar la solidez del análisis.

Planteamiento del Problema

En la actualidad, la demanda de energía eléctrica en los hogares sigue aumentando debido al crecimiento poblacional y al desarrollo tecnológico lo que ha generado una mayor dependencia de fuentes de energía no renovables. Este consumo creciente de energía tiene consecuencias ambientales negativas, como la emisión de gases de efecto invernadero y la contaminación atmosférica, además de una mayor vulnerabilidad a los cambios en los precios del petróleo y otros recursos energéticos (International Energy Agency 2021; Intergovernmental Panel on Climate Change 2022).

Para abordar estos desafíos, la energía solar fotovoltaica se presenta como una solución prometedora para satisfacer las necesidades energéticas residenciales de manera sostenible y ecoamigable. Sin embargo, a pesar de sus ventajas potenciales, su adopción a gran escala en entornos residenciales enfrenta una serie de desafíos técnicos, económicos y regulatorios (REN21 2023; Jones y Li, 2022). Entre los desafíos más importantes en el ámbito de la energía fotovoltaica se encuentra mejorar la eficiencia de los módulos, que actualmente presentan una capacidad promedio de conversión de luz solar en electricidad de entre el 15% y el 20%. Este nivel de eficiencia limita la cantidad de energía que se puede generar en una superficie determinada, lo que subraya la necesidad de continuar innovando en materiales y tecnologías para optimizar su desempeño (Sigma Earth, 2024).

La limitación en la implementación de sistemas fotovoltaicos en viviendas de tipo multifamiliar se debe principalmente a la cantidad de espacio requerido en las cubiertas, lo que aumenta el valor de la inversión. Para abordar esta situación, se han propuesto diversas estrategias de optimización, tales como el uso de seguidores solares, sistemas de control de temperatura, paneles bifaciales y tecnologías reflectivas, entre otras. Sin embargo, aún no se han

determinado sus características y efectividad en aplicaciones residenciales en el contexto colombiano. Esto da lugar a la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo se pueden comparar las estrategias de optimización energética en sistemas fotovoltaicos para aplicaciones residenciales en Colombia?

Para abordar esta cuestión, se plantea llevar a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva sobre las tecnologías de optimización fotovoltaica disponibles, así como una búsqueda de experiencias exitosas en la industria y en la comunidad. Este análisis permitirá identificar las mejores prácticas y determinar la viabilidad de estas tecnologías en el contexto colombiano, considerando factores como el clima, la disponibilidad de espacio en viviendas multifamiliares y las condiciones económicas. Con los resultados obtenidos, se podrán proponer soluciones adaptadas a las necesidades específicas del país, mejorando así la adopción de sistemas fotovoltaicos en el sector residencial y contribuyendo a la transición hacia fuentes de energía más sostenibles.

Justificación

La eficiencia y el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos pueden verse afectados por factores como la ubicación geográfica, la inclinación y la orientación de los paneles solares, así como las condiciones climáticas locales. Identificar las configuraciones óptimas para maximizar la producción de energía es fundamental para garantizar la viabilidad económica de estos sistemas. (Wirth, 2022)

Las células solares presentan una eficiencia significativamente menor en condiciones reales comparado con el rendimiento en laboratorio. Los factores ambientales, como variaciones en la intensidad de la luz solar, temperaturas fluctuantes y acumulación de polvo, impactan negativamente la eficiencia de conversión de energía. Por ejemplo, mientras que las células solares de silicio monocristalino pueden alcanzar eficiencias superiores al 25% en laboratorio, su eficiencia operativa en campo rara vez supera el 20% (National Renewable Energy Laboratory [NREL], 2023).

La eficiencia de las células solares disminuye con el tiempo debido a la degradación de materiales. Factores como la exposición a radiación ultravioleta, ciclos térmicos y humedad pueden deteriorar los componentes de las células solares, reduciendo su eficiencia. Este fenómeno es particularmente problemático en regiones con condiciones climáticas extremas (Wirth, 2022).

Las pérdidas en el sistema, incluyendo las asociadas a la conversión de corriente continua a corriente alterna, la resistencia de los materiales conductores y las pérdidas por sombreado, también afectan la eficiencia general de los sistemas fotovoltaicos. Estas pérdidas pueden acumularse y reducir significativamente la energía neta obtenida de un sistema fotovoltaico instalado (BSarkar et al., 2023).

Aunque las tecnologías de tercera generación, como las células perovskita y las células tandem, han mostrado potencial para mejorar la eficiencia, enfrentan desafíos significativos en términos de estabilidad y durabilidad. Las células solares perovskita han demostrado un alto potencial en términos de eficiencia. No obstante, presentan desafíos significativos relacionados con su inestabilidad frente a factores ambientales como la luz, la humedad y el calor. Esta inestabilidad limita su viabilidad comercial, especialmente en aplicaciones de larga duración. Además, aunque las células perovskita se pueden sintetizar y fabricar fácilmente a gran escala, su integración en procesos industriales aún no ha sido optimizada completamente, lo que representa un obstáculo adicional para su adopción masiva (DSI Solar 2019; Emergen Research, s.f. Securities.io, 2023).

Visualizando las opciones de optimización de los paneles solares expuestas anteriormente son diversas y poco profundas respecto a su utilización en entornos reales y aplicaciones residenciales, entonces se pretende realizar una búsqueda que permita definir las tecnologías y prácticas más adecuadas al clima, topografía y tipos de vivienda existentes en la zona centro urbana del país. El análisis de estrategias de optimización energética en sistemas fotovoltaicos puede impulsar la adopción de energía solar en Colombia, especialmente en regiones como Bogotá y la costa colombiana, donde las condiciones climáticas y geográficas son contrastantes. En Bogotá, el clima frío y nuboso limita la intensidad de la radiación solar, mientras que la costa enfrenta desafíos como altas temperaturas y humedad, que afectan la durabilidad y el rendimiento de los sistemas.

Factores como las pérdidas por sombreado, la conversión de corriente y la degradación de materiales complican aún más la eficiencia operativa, que suele ser inferior a los valores obtenidos en laboratorio (NREL 2023; Wirth 2022). Aunque tecnologías emergentes como las

células perovskita y tandem prometen mejorar la eficiencia, enfrentan problemas de estabilidad en condiciones reales. Por ello, se propone identificar configuraciones y prácticas óptimas para maximizar la producción de energía solar en entornos residenciales de estas regiones, considerando las particularidades del clima, la topografía y los tipos de vivienda. Este análisis permitirá desarrollar soluciones adaptadas y sostenibles, fomentando una mayor adopción de sistemas fotovoltaicos en el país.

Objetivos

Objetivo General

Analizar las estrategias de optimización energética en sistemas de energía fotovoltaica para aplicaciones residenciales, enfocado en las regiones de Bogotá y la costa colombiana, con el objetivo de identificar configuraciones óptimas que maximicen la eficiencia y viabilidad de estos sistemas en el contexto local.

Objetivos Especifico

Comparar diversas tecnologías solares fotovoltaicas disponibles en el mercado, incluyendo paneles monocristalinos, policristalinos y de película delgada, analizar sus características, ventajas y limitaciones en términos de eficiencia energética.

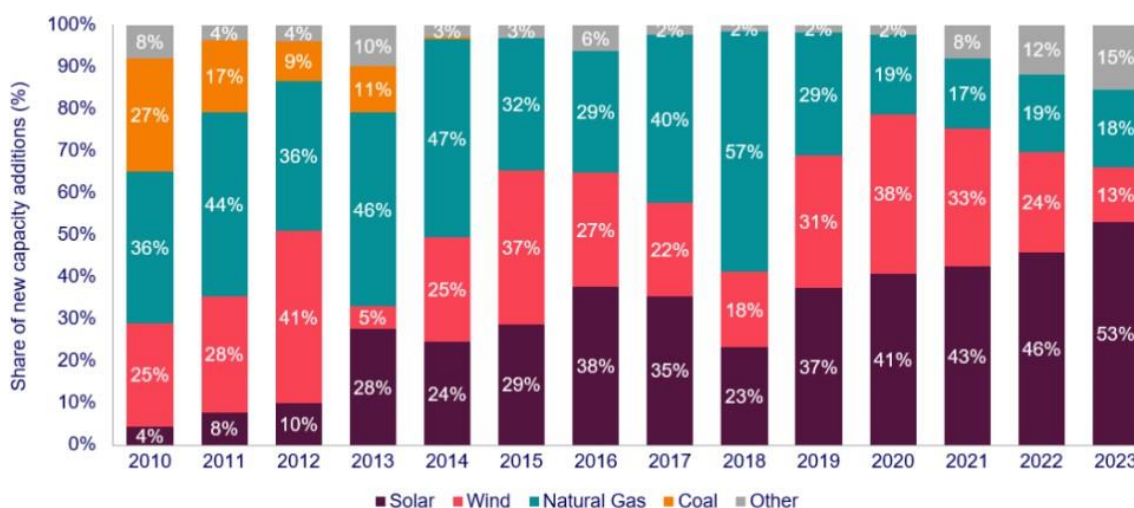
Realizar un análisis de resultados para evaluar el desempeño y la eficiencia de diferentes sistemas solares fotovoltaicos en aplicaciones residenciales.

Desarrollo del Trabajo: Innovaciones en Materiales Fotovoltaicos

En el análisis realizado sobre los avances en materiales fotovoltaicos, se ha revisado una amplia gama de estudios recientes que destacan los progresos realizados en la mejora de la eficiencia energética de las células solares. Estos estudios ofrecen una visión integral de cómo los nuevos materiales y enfoques tecnológicos están transformando el panorama de la energía solar. Desde esta perspectiva, cada avance en el campo parece estar impulsando la competitividad de la energía solar, llevándola a un nivel superior en términos de rendimiento y accesibilidad. La incorporación de materiales como las células perovskitas, los compuestos de silicio avanzado y las tecnologías de película delgada ha sido clave para incrementar la eficiencia energética y reducir los costos de producción. Además, los sistemas de refrigeración pasiva y activa, junto con técnicas de seguimiento solar y modelos dinámicos, han optimizado el desempeño de los paneles en diferentes condiciones climáticas. Estos avances no solo mejoran la eficiencia en la captación y conversión de energía solar, sino que también amplían el rango de aplicaciones, desde entornos urbanos hasta regiones con condiciones extremas. En conjunto, la integración de estos desarrollos tecnológicos está facilitando la transición hacia un modelo energético más sostenible y competitivo a nivel global.

Figura 1

Capacidad de Generación Eléctrica de Estados Unidos (2010-2023)



Nota. (SEIA, 2023). U.S. Solar Market Insight Report Q1 2023.

El estudio de Sarkar et al. (2023), establece una base sólida para comprender cómo los modelos matemáticos aplicados a los módulos fotovoltaicos contribuyen a optimizar el rendimiento de los materiales semiconductores. Herramientas como Simulink resultan clave al permitir la simulación de diversas condiciones climáticas y su impacto en los módulos, facilitando ajustes precisos en el diseño para maximizar la eficiencia energética. Este enfoque es particularmente relevante, dado que los materiales fotovoltaicos, como el silicio, son sensibles a las condiciones ambientales, y la posibilidad de simular escenarios climáticos variados resulta esencial para mejorar su desempeño en condiciones reales.

Desde una perspectiva más amplia, la capacidad de predicción que ofrecen estas simulaciones es fundamental para impulsar el desarrollo de nuevas tecnologías en el ámbito fotovoltaico. Al analizar el comportamiento de las células solares bajo diferentes condiciones

ambientales, se puede identificar de manera más precisa cómo optimizar tanto los materiales como los diseños para alcanzar un mejor rendimiento energético.

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{nKT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

I

Donde:

I : Corriente del modulo.

V : Voltage aplicado.

I_{sc} : Corriente de cortocircuito.

I_0 : Corriente de saturación inversa.

R_s : Resistencia serie.

R_{sh} : Resistencia de shunt.

Salidas clave:

Gráficas I–V y P–V que muestran cómo cambia la corriente, el voltaje y la potencia bajo diferentes niveles de radiación solar y temperatura.

Por otro lado, el trabajo de Wang et al. (2020) sobre las células solares de tercera generación ha sido uno de los más reveladores para mí. En su investigación, abordan el uso de células perovskitas y células multijuntura, dos materiales que continúan demostrando un potencial significativo para superar las limitaciones de las células de silicio tradicionales. Las células perovskitas, en particular, han evolucionado en los últimos años, alcanzando eficiencias de conversión cercanas al 25%, lo que las coloca al nivel de las tecnologías de silicio más maduras. Además, su capacidad para capturar una mayor parte del espectro solar las convierte en candidatas ideales para aumentar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos. Lo que parece aún más prometedor es que los avances en la estabilidad y durabilidad de las células perovskitas

están permitiendo su comercialización gradual, haciendo que esta tecnología no solo sea eficiente, sino también más accesible en términos de costos de producción.

Este tipo de avances resulta fascinante, ya que no solo potencian la eficiencia de conversión energética, sino que también están transformando el acceso a las tecnologías solares avanzadas a nivel global. Estos progresos contribuyen a democratizar el uso de la energía solar, haciéndola más accesible en diversos entornos geográficos y climáticos. La capacidad de adaptar las tecnologías fotovoltaicas a diferentes contextos amplía significativamente su impacto, acercando soluciones sostenibles a regiones que anteriormente enfrentaban barreras para su implementación.

Las células solares se dividen en tres generaciones, cada una con características y avances específicos:

Primera generación (silicio): Estas células están fabricadas principalmente con silicio cristalino. Son las más utilizadas comercialmente debido a su eficiencia estable (18-22%) y durabilidad. Sin embargo, su costo de producción es elevado debido a la pureza del silicio requerido y los procesos de fabricación.

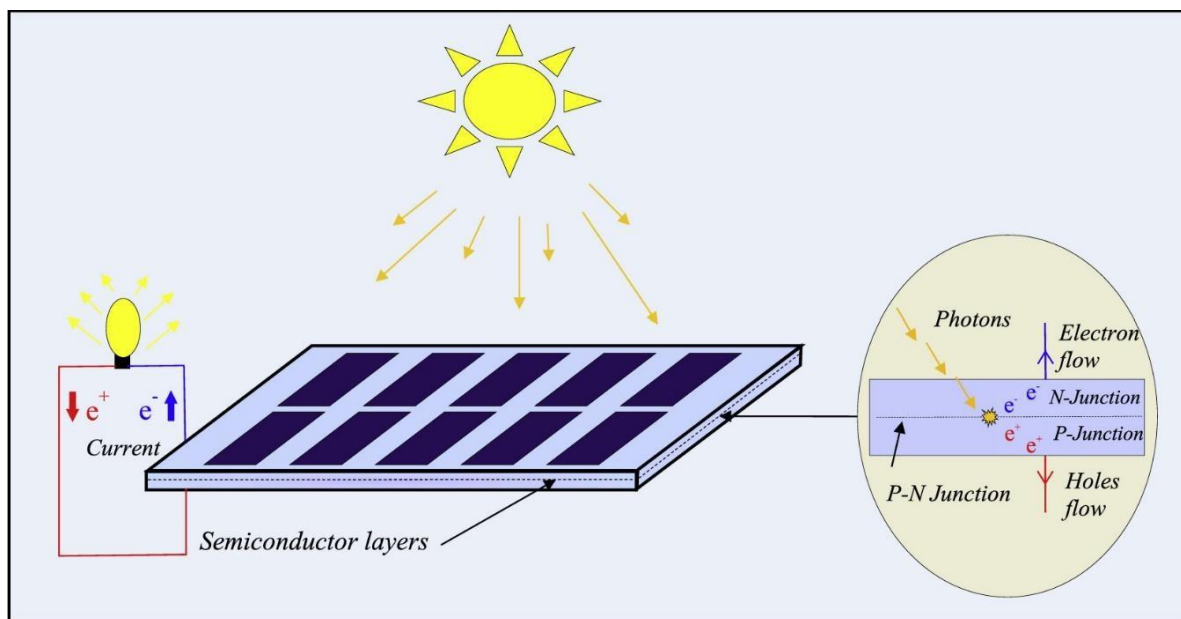
Segunda generación (películas delgadas): Estas células usan materiales como telurio de cadmio (CdTe) o diseleniuro de cobre, indio y galio (CIGS). Son más baratas de producir, pero su eficiencia es menor (12-16%) debido a las limitaciones en la absorción de luz.

Tercera generación (células perovskitas y células multijuntura): Las células perovskitas son materiales semiconductores que han alcanzado eficiencias comparables a las de las células de silicio (~25%). Además, las células multijuntura combinan varias capas de semiconductores para capturar diferentes partes del espectro solar, alcanzando eficiencias superiores al 30%.

El análisis de Jones y Li (2022) es otro aporte valioso en el ámbito de los materiales semiconductores. Este estudio aborda los principios físicos y la ingeniería de la conversión fotovoltaica, subrayando la importancia de comprender cómo los electrones interactúan con los semiconductores en las células solares. Aprecio cómo este trabajo explica las limitaciones de los materiales actuales y cómo los avances en materiales híbridos pueden superarlas. En particular, el desarrollo de células tandem que combinan diferentes capas de semiconductores para capturar más luz solar es un avance emocionante que puede aumentar la eficiencia más allá de los límites de las células solares convencionales de silicio.

Figura 2

Panel Fotovoltaico



Nota. (Gupta & Mehra, 2018). Cooling technologies for improving solar panel efficiency.

International Journal of Solar Technology.

Otro estudio reciente de Jones et al (2022) explora el uso de células solares sensibilizadas por colorante (DSSC), que son particularmente eficaces en condiciones de luz difusa. Esta tecnología es especialmente relevante en regiones con poca radiación solar directa, como áreas

nubladas o con climas más fríos. Desde mi punto de vista, el desarrollo de células solares que puedan capturar la luz difusa representa una innovación clave, ya que extiende el uso de la energía solar a áreas geográficas donde los paneles convencionales son menos efectivos. Esto también sugiere que los avances en materiales fotovoltaicos no se limitan solo a aumentar la eficiencia en climas soleados, sino también a mejorar el rendimiento en condiciones adversas.

Las células solares sensibilizadas por colorante (DSSC) son ideales para condiciones de luz difusa, como climas nublados.

Características:

Usan un colorante que absorbe la luz y genera electrones.

Su rendimiento es excelente en regiones con baja radiación solar directa.

Aplicaciones:

Lugares con alta nubosidad o regiones frías donde las tecnologías tradicionales no son tan efectivas.

En línea con los avances en materiales, el estudio de Jones y Li (2022), sobre las células solares perovskita destaca el potencial de este material no solo por su alta eficiencia sino también por su bajo costo de producción. Este artículo subraya los esfuerzos de investigación para mejorar la estabilidad de las células perovskita, que ha sido uno de los principales desafíos para su comercialización. Considero que la célula perovskita representa una de las áreas más emocionantes de la investigación en energía solar, ya que podría reducir los costos de producción y mejorar significativamente la eficiencia, lo que haría que la energía solar sea más competitiva frente a otras fuentes de energía renovable.

Por otra parte, Feng y Li (2019) abordan el desafío de mejorar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos en climas extremos. Su investigación sobre cómo los materiales

avanzados, como los compuestos inorgánicos y las células perovskitas, pueden resistir condiciones adversas como altas temperaturas o fuertes vientos es fundamental para asegurar que los sistemas solares puedan operar de manera eficiente en cualquier lugar del mundo. Me parece crucial que se continúen desarrollando materiales más robustos que no solo mejoren la eficiencia en condiciones ideales, sino también en entornos donde las células solares tradicionales podrían fallar. La temperatura afecta significativamente la eficiencia de las células solares:

$$\eta_T = \eta_0 [1 - \beta(T - T_{ref})]$$

2

Donde:

η_T : Eficiencia a temperatura T.

η_0 : Eficiencia a temperatura de referencia T_{ref} .

β : Coeficiente de temperatura.

Sistemas de Refrigeración

Métodos activos (ventiladores) y pasivos (diseño de materiales) para mantener la eficiencia en climas cálidos.

Estos avances, como la implementación de técnicas de procesamiento más rápidas y automatizadas, resultan esenciales para que las tecnologías fotovoltaicas emergentes puedan ingresar al mercado de manera competitiva. Es especialmente interesante cómo se destaca en la literatura la importancia de equilibrar la eficiencia de conversión energética con la reducción de costos, un factor crucial para ampliar el acceso a las tecnologías solares a un público más diverso. Este enfoque resulta clave para garantizar que los desarrollos en materiales fotovoltaicos no se queden en el ámbito experimental, sino que evolucionen hacia soluciones prácticas, económicamente viables y escalables.

A medida que los procesos de fabricación continúan mejorando, resulta fundamental que estos avances se integren con el desarrollo de nuevos materiales, facilitando la implementación masiva de tecnologías solares en distintas regiones del mundo. Este enfoque permite que la energía solar no solo sea más eficiente, sino también más accesible y adaptable a diversos contextos geográficos y climáticos.

Un ejemplo relacionado es el estudio de Gupta y Mehra (2018), que analiza el impacto de las tecnologías de refrigeración en la eficiencia de los paneles solares en climas cálidos. Los materiales fotovoltaicos, especialmente los basados en silicio, suelen experimentar una reducción en su rendimiento con el aumento de temperatura. La incorporación de sistemas de refrigeración ya sea pasiva o activa, mitiga estos efectos térmicos, asegurando un desempeño óptimo en escenarios desfavorables. Este enfoque operacional complementa de manera estratégica los avances en materiales, contribuyendo a maximizar la eficiencia de los paneles solares y su viabilidad en escenarios climáticos desafiantes.

Optimización Operativa: Refrigeración y Control Climático en Paneles Solares

La optimización operativa de los sistemas fotovoltaicos ha sido objeto de numerosos estudios recientes que destacan cómo el control climático y las tecnologías de refrigeración impactan directamente en la eficiencia de los paneles solares. Aunque las células solares han experimentado notables avances en eficiencia durante las últimas décadas, mantener un desempeño óptimo en condiciones ambientales adversas sigue siendo un desafío crucial. En este contexto, las tecnologías de control de temperatura y refrigeración se han convertido en elementos clave para la optimización de los sistemas fotovoltaicos, ya que el calor excesivo y las fluctuaciones climáticas pueden afectar significativamente su rendimiento operativo.

Entre los estudios más destacados se encuentra el de Sarkar et al. (2023), que exploran el uso de modelos matemáticos para simular el comportamiento de los módulos fotovoltaicos bajo diversas condiciones ambientales. Este enfoque permite ajustar parámetros operativos con base en las simulaciones, mejorando así el rendimiento en tiempo real. Factores como la temperatura ambiente y la irradiancia solar influyen notablemente en la generación de energía, y herramientas como Simulink se han convertido en recursos esenciales para modelar estos sistemas. Estas simulaciones no solo predicen el comportamiento de los paneles en distintos climas, sino que también permiten diseñar estrategias de mitigación eficaces antes de la instalación. En la tabla 1 presenta los parámetros fundamentales del modelo fotovoltaico bajo distintas condiciones climáticas, incluyendo valores de temperatura, corriente y resistencia.

El modelo básico de la corriente generada por un módulo fotovoltaico puede describirse mediante la siguiente ecuación general:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

3

I: Corriente del módulo.

I_{ph} : Corriente fotogenerada.

I_0 : Corriente de saturación inversa.

V: Voltaje del módulo.

R_s : Resistencia serie.

R_{sh} : Resistencia shunt.

q: Carga del electrón.

n: Factor de idealidad del diodo.

k: Constante de Boltzmann.

T: Temperatura absoluta.

Tabla 1

Parámetros del modelo fotovoltaico para diferentes condiciones climáticas

Parámetro	Condiciones frías	Condiciones cálidas	Condiciones de alta irradiancia
T (°C)	10	45	35
I _{ph} (A)	4.5	3.8	5.0
I ₀ (A)	1×10^{-10}	5×10^{-10}	3×10^{-10}
R _s (Ω)	0.2	0.3	0.1

Nota. Datos adaptados de (Sarkar et al., 2023).

Gupta y Mehra (2018), abordan de manera detallada el impacto de las tecnologías de refrigeración activa y pasiva en la eficiencia de los paneles solares, centrándose especialmente en climas cálidos. Es particularmente interesante cómo proponen soluciones innovadoras, como la refrigeración líquida, la refrigeración por aire y las técnicas de enfriamiento evaporativo, para reducir las temperaturas de operación de los paneles. Estas estrategias son cruciales, ya que, como lo demuestran numerosos estudios, las altas temperaturas tienen un efecto adverso significativo en la eficiencia de los materiales fotovoltaicos, especialmente aquellos basados en silicio.

La implementación de estos métodos de refrigeración no solo aborda un desafío técnico, sino que también tiene implicaciones prácticas importantes. En regiones con temperaturas extremas, donde la eficiencia de los paneles solares se ve más afectada, la demanda de energía suele ser alta debido al uso intensivo de aire acondicionado y otros dispositivos que consumen grandes cantidades de energía. Por lo tanto, mejorar el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos

mediante tecnologías de refrigeración podría no solo incrementar la eficiencia energética, sino también contribuir a satisfacer la creciente demanda de energía de manera sostenible.

Estos avances subrayan la importancia de combinar enfoques tecnológicos tanto en el diseño de materiales como en las estrategias operativas para maximizar el potencial de la energía solar, especialmente en entornos donde su aplicación puede tener el mayor impacto social y económico. En la tabla 2 se evalúan los métodos de refrigeración activos y pasivos para paneles solares, mostrando su impacto en la temperatura y la eficiencia energética.

La mejora en la eficiencia debido a la refrigeración puede ser modelada mediante:

$$\Delta\eta = \eta_{ref} * \gamma * (T_{op} - T_{cool})$$

4

$\Delta\eta$: Cambio en la eficiencia.

η_{ref} : Eficiencia de referencia.

γ : Coeficiente de mejora por cada grado de enfriamiento.

T_{op} : Temperatura operativa del panel sin refrigeración.

T_{cool} : Temperatura del panel con refrigeración.

Tabla 2

Efectividad de Diferentes Métodos de Refrigeración

Método de refrigeración	Reducción promedio de temperatura (°C)	Mejora en la eficiencia (%)
Refrigeración líquida	15	10
Enfriamiento por aire	8	6
Enfriamiento evaporative	20	12

Nota. Datos extraídos de (Feng y Li, 2019).

El enfoque de Wang et al (2020), es particularmente relevante, ya que aborda uno de los principales desafíos que enfrentan las células solares perovskita: la estabilidad térmica y ambiental. La comparación con las células de silicio resalta la competitividad de las células perovskitas, no solo en términos de eficiencia, sino también en su potencial económico y práctico. Las innovaciones en encapsulado propuestas en su estudio apuntan a superar las barreras de durabilidad, permitiendo su implementación en regiones de climas cálidos y húmedos. Considero que este avance no solo incrementa la viabilidad comercial de las células perovskitas, sino que también podría acelerar la transición hacia fuentes de energía más sostenibles y accesibles. En la tabla 3 se comparan las eficiencias y coeficientes de temperatura de diferentes tecnologías de paneles solares, destacando su desempeño en climas cálidos y fríos.

Impacto de la Temperatura en la Eficiencia de los Paneles Fotovoltaicos

La eficiencia de los paneles solares se ve afectada por la temperatura, y esto se puede modelar matemáticamente utilizando la ecuación de temperatura de referencia:

$$\eta(T) = \eta_{STC} * [1 - \beta * (T - T_{STC})]$$

5

$\eta(T)$: Eficiencia del panel a una temperatura T.

η_{STC} : Eficiencia bajo condiciones estándar (STC, Standard Test Conditions).

β : Coeficiente de temperatura del módulo fotovoltaico.

T_{STC} : Temperatura de referencia (normalmente 25°C).

Tabla 3

Coeficientes de Temperatura y Eficiencias de Paneles Solares

Tecnología	Eficiencia (η_{STC})	Coeficiente de temperatura (β)
-------------------	---	--

Silicio monocristalino	20%	-0.4%/°C
Silicio policristalino	18%	-0.45%/°C
Células perovskita	23%	-0.3%/°C

Nota. Datos adaptados de (Gupta y Mehra, 2018; Wang et al. 2020).

El artículo de Narvaez et al. (2023). presenta un enfoque innovador al introducir un sistema de monitoreo dinámico para los paneles solares que adapta sus parámetros operativos a las condiciones climáticas mediante algoritmos de control basados en retroalimentación. Este sistema utiliza la lógica de control proporcional-integral-derivativo (PID) para realizar ajustes en tiempo real, optimizando la eficiencia de los paneles frente a fluctuaciones en temperatura, radiación solar y humedad.

Este modelo no solo mejora la adaptabilidad del sistema, sino que también reduce la pérdida de eficiencia provocada por cambios rápidos en las condiciones climáticas, lo que lo convierte en una solución práctica para áreas con climas impredecibles. Desde mi perspectiva, este tipo de innovación puede marcar un cambio significativo en el rendimiento y la fiabilidad de los sistemas fotovoltaicos en diversas regiones.

Narvaez et al. (2023), proponen un sistema de monitoreo dinámico para ajustar los parámetros operativos basándose en condiciones meteorológicas. El ajuste se realiza mediante algoritmos de control basados en retroalimentación, que se pueden modelar con la ecuación de control PID:

$$u(t) = K_p e(t) + k_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

6

$u(t)$: Señal de control.

$e(t)$: Error entre la salida deseada y la medida.

Kp: Ganancia proporcional.

Ki: Ganancia integral.

Kd: Ganancia derivativa.

Shen et al. (2020) analizan la automatización en los sistemas de refrigeración de células solares, subrayando el papel de sensores y algoritmos avanzados para gestionar la temperatura de los paneles solares de manera eficiente. Según su estudio, los sensores permiten una monitorización continua de la temperatura y ajustan automáticamente los sistemas de refrigeración, incrementando así la eficiencia energética y reduciendo costos operativos a largo plazo. Consideran que esta automatización es esencial para optimizar el rendimiento diario y extender la vida útil de los sistemas.

Feng y Li (2019), por su parte, proponen soluciones específicas para climas extremos, como zonas desérticas o montañosas, mediante el uso de refrigeración líquida y sistemas de enfriamiento evaporativo. Su trabajo destaca que estas estrategias son particularmente eficaces para reducir las temperaturas de operación en ambientes adversos, lo que las convierte en una herramienta fundamental para proyectos solares en regiones de alto potencial solar pero con condiciones hostiles.

El informe de SEIA (2023) aporta una visión complementaria, destacando la adopción de tecnologías avanzadas de monitoreo y control de temperatura en instalaciones fotovoltaicas a gran escala en los Estados Unidos. Según el informe, el uso de sistemas de refrigeración activa no solo optimiza la eficiencia operativa, sino que también prolonga la vida útil de los componentes, lo que lo convierte en un elemento clave para maximizar el retorno de la inversión en proyectos solares.

Chowdhury et al (2021) ofrecen un enfoque distinto mediante el diseño de paneles solares con superficies reflectantes y materiales avanzados para refrigeración pasiva. Este método permite disipar el calor de manera efectiva sin necesidad de sistemas activos, siendo especialmente adecuado para regiones con limitaciones económicas o de infraestructura. Según los autores, estas innovaciones representan una solución de bajo costo para mejorar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos en áreas con recursos limitados.

Hossain y Rahman (2020) exploran la integración de sistemas fotovoltaicos con redes inteligentes que incorporan otras fuentes de energía renovable. Argumentan que esta integración mejora la eficiencia operativa al equilibrar la demanda energética en tiempo real, reduciendo la dependencia de sistemas de almacenamiento. Este enfoque se destaca por su capacidad para optimizar el uso de múltiples tecnologías renovables, fomentando un sistema energético más equilibrado y sostenible.

Sistemas de Seguimiento Solar y Modelos Dinámicos en Paneles Solares

En el análisis sobre Sistemas de Seguimiento Solar y Modelos Dinámicos aplicados a los sistemas fotovoltaicos, se observa un enfoque en dos tecnologías clave que han transformado el rendimiento de los paneles solares: el seguimiento solar y los modelos dinámicos. Estas herramientas, implementadas de manera conjunta o independiente, han demostrado ser esenciales para maximizar la captación de energía y optimizar las operaciones en tiempo real.

El seguimiento solar, según numerosos estudios, es una estrategia efectiva para aumentar la captación de luz solar, ya que ajusta la orientación de los paneles solares a lo largo del día siguiendo la trayectoria del sol. Esta técnica mejora significativamente la eficiencia energética, especialmente en proyectos fotovoltaicos a gran escala. Por otro lado, los modelos dinámicos

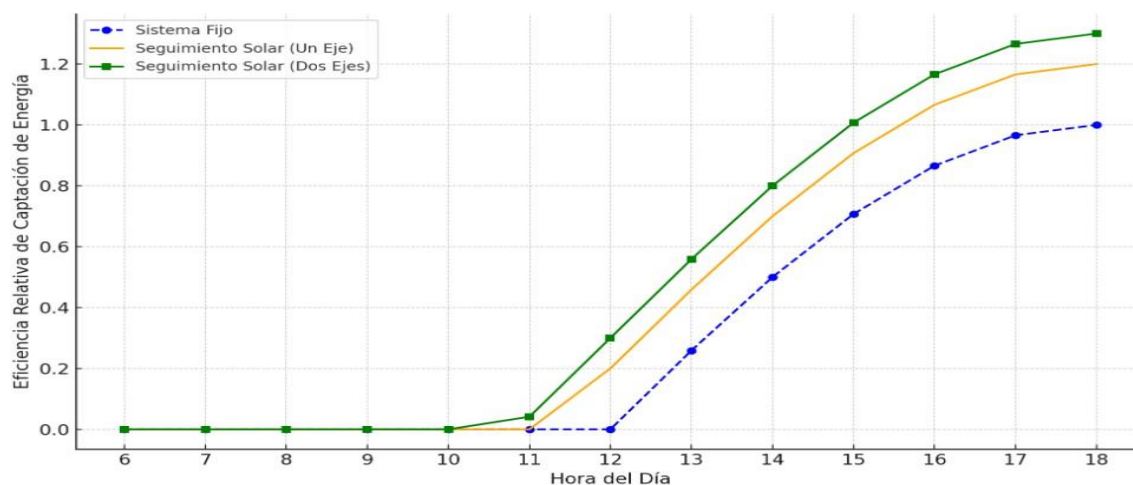
permiten prever y adaptarse a cambios en las condiciones ambientales, ajustando parámetros operativos para mantener un rendimiento óptimo.

Además, investigaciones recientes han integrado sistemas de seguimiento solar con algoritmos avanzados, como control predictivo o aprendizaje automático, que anticipan cambios climáticos y optimizan el movimiento de los paneles. Esto no solo aumenta la eficiencia, sino que también reduce el desgaste mecánico al limitar movimientos innecesarios.

Al complementar esta perspectiva con los modelos dinámicos, se facilita una gestión inteligente de los sistemas fotovoltaicos. Por ejemplo, los modelos de control PID, que ya mencionaste en otro contexto, se adaptan bien a estos sistemas, proporcionando ajustes precisos y en tiempo real. Asimismo, estudios que exploran redes inteligentes han demostrado cómo el análisis de datos en tiempo real desde estaciones meteorológicas o sensores distribuidos puede integrarse para mejorar aún más la eficiencia de captación solar.

La combinación de estas tecnologías tiene implicaciones importantes para áreas con condiciones climáticas variables o desafiantes. Por ejemplo, en climas áridos, donde las fluctuaciones de radiación solar son más notorias, el seguimiento solar ajustado por modelos dinámicos permite aprovechar al máximo las horas de mayor insolación, mientras que sistemas automatizados de limpieza o refrigeración pueden ser gestionados en paralelo para garantizar operaciones continuas. Estos avances reflejan una evolución continua en la ingeniería fotovoltaica, subrayando el potencial de innovación en el sector y su papel en la transición hacia fuentes de energía más sostenibles.

En la figura 3 muestra la captación de energía para:

Figura 3*Eficiencia Relativa de Captación de Energía*

Nota. Autoría propia

La ilustración muestra la eficiencia relativa de captación de energía a lo largo del día (en horas) para tres sistemas diferentes: un sistema fijo (línea azul discontinua), un sistema de seguimiento solar de un eje (línea naranja sólida) y un sistema de seguimiento solar de dos ejes (línea verde sólida con marcadores cuadrados). Las unidades en el eje vertical representan la eficiencia relativa (escala arbitraria normalizada), mientras que el eje horizontal indica las horas del día desde las 6:00 hasta las 18:00.

Este análisis busca resaltar la capacidad de captación mejorada de los sistemas de seguimiento solar, donde el sistema de dos ejes muestra la mayor eficiencia, especialmente entre las 10:00 y las 17:00 horas.

Sistema Fijo: Captación menor, ya que los paneles no siguen al sol.

Sistema con Seguimiento Solar de un Eje: Aumenta la captación al ajustarse a la posición del sol en un solo plano.

Sistema con Seguimiento Solar de dos Ejes: Maximiza la captación al ajustarse tanto horizontal como verticalmente.

Sarkar et al. (2023), presentan una base sólida para comprender la modelación dinámica de los módulos fotovoltaicos mediante el uso de Simulink. Estos modelos permiten simular las condiciones ambientales y su impacto en los sistemas fotovoltaicos, ajustando dinámicamente los parámetros de los paneles para maximizar la eficiencia energética. En la tabla 4 detalla los valores típicos de parámetros clave en climas fríos, cálidos y con alta irradiancia, ayudando a modelar el rendimiento de los paneles. Esto es particularmente útil en climas variables, donde la capacidad de los modelos dinámicos para responder a cambios en la irradiancia solar y la temperatura es clave para mantener un rendimiento óptimo. La ecuación fundamental que describe la corriente generada en un módulo fotovoltaico es:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + I * R_s)}{n * k * T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I * R_s}{R_{sh}}$$

7

I: Corriente de salida del panel.

I_{ph}: Corriente fotogenerada.

I₀: Corriente de saturación inversa del diodo.

V: Voltaje del panel.

R_s: Resistencia serie del módulo.

R_{sh}: Resistencia shunt.

q: Carga del electrón (1.6×10⁻¹⁹C).

k: Constante de Boltzmann (1.38×10⁻²³ J/K).

T: Temperatura del módulo en Kelvin.

n: Factor de idealidad del diodo.

Tabla 4

Parámetros del Modelo Fotovoltaico para Diferentes Condiciones Climáticas

Parámetro	Valor en Climas Fríos	Valor en Climas Cálidos	Valor en Alta Irradiancia
T (°C)	10	45	35
I _{ph} (A)	4.2	3.8	5.5
I ₀ (A)	1.5×10^{-10}	5×10^{-10}	2×10^{-10}
R _s (Ω)	0.15	0.3	0.1

Nota. Datos adaptados de (Sarkar et al., 2023).

En una línea similar Narvaez et al. (2023), exploran cómo los sistemas de seguimiento solar pueden mitigar los efectos de la variabilidad climática. Proponen un enfoque en el que los paneles solares ajustan su posición automáticamente para optimizar la captación de energía, compensando la disminución de la irradiancia en días nublados o durante los cambios estacionales. En la tabla 5 podemos observar el rendimiento de los sistemas con y sin seguimiento solar. Este tipo de sistemas es fundamental en regiones con fluctuaciones climáticas constantes, donde los modelos estáticos no pueden maximizar el rendimiento a lo largo del año.

Tipos de Sistemas de Seguimiento Solar

Seguimiento de un solo eje: Ajusta el panel a lo largo de un solo eje (horizontal o vertical), siguiendo el movimiento diario del sol.

Seguimiento de dos ejes: Permite una orientación precisa del panel, siguiendo tanto la elevación como el acimut del sol.

La eficiencia adicional obtenida con los sistemas de seguimiento puede modelarse mediante:

$$E_{track} = E_{fixed} * (1 + \Delta\eta_{track})$$

8

E_{track}: Energía generada con el seguimiento solar.

E_{fixed}: Energía generada con un sistema fijo.

Δη_{track}: Mejora en la eficiencia debido al seguimiento solar (20-30% en promedio).

Tabla 5

Rendimiento de Sistemas Con y Sin Seguimiento Solar

Tipo de Sistema	Eficiencia Relativa	Mejora en la Captación de Energía
Sistema Fijo	100%	-
Seguimiento de un solo eje	120%	+20%
Seguimiento de dos ejes	130%	+30%

Nota. Datos adaptados de (Narvaez et al., 2023).

Shen et al. (2020), abordan el desarrollo de sistemas automatizados de seguimiento solar que utilizan sensores y algoritmos avanzados para ajustar continuamente la orientación de los paneles solares. A través de la integración de sensores de luz y temperatura, estos sistemas pueden mejorar la eficiencia de conversión al seguir el sol con mayor precisión, reduciendo las pérdidas energéticas debidas a la subóptima orientación de los paneles. Este tipo de innovación es un avance esencial para garantizar que los paneles solares puedan operar en sus condiciones más eficientes, independientemente de la ubicación geográfica. La ecuación que describe la corrección del ángulo de inclinación es:

$$\theta_{opt} = \arctan \left(\frac{\sin \delta}{\cos \phi - \sin \phi * \tan \delta} \right)$$

9

θ_{opt}: Ángulo de inclinación óptimo.

δ : Declinación solar.

ϕ : Latitud de la ubicación.

Feng y Li (2019) complementan esta perspectiva con un análisis sobre cómo los sistemas de seguimiento pueden optimizarse para entornos climáticos extremos. Su estudio destaca la importancia de integrar modelos dinámicos que no solo ajusten la posición de los paneles solares, sino que también consideren variables como la velocidad del viento y la temperatura ambiental para mitigar los daños potenciales y mejorar la durabilidad de los sistemas fotovoltaicos en circunstancias complicadas. Este enfoque es crucial para asegurar que las tecnologías fotovoltaicas puedan ser utilizadas en una gama más amplia de entornos, incluidos aquellos con climas severos.

Un enfoque interesante es el que presentan Gupta y Mehra (2018), quienes analizan el uso combinado de refrigeración activa y sistemas de seguimiento solar para mejorar la eficiencia de los paneles en climas cálidos. En este estudio, los autores proponen un enfoque híbrido en el que los sistemas de refrigeración se activan junto con el seguimiento solar para mantener las temperaturas de los paneles dentro de los rangos óptimos de operación. Esta combinación no solo maximiza la eficiencia de conversión, sino que también prolonga la vida útil de los paneles al reducir el impacto del calor excesivo, lo cual es particularmente importante en regiones de alta radiación solar. En la tabla 6 se analiza el impacto conjunto de las tecnologías de seguimiento solar y refrigeración activa sobre la eficiencia de los paneles solares.

Tabla 6

Efecto Combinado del Seguimiento Solar y la Refrigeración Activa

Estrategia	Mejora en la Eficiencia (%)
Solo seguimiento solar	20-30%

Solo refrigeración active	10-15%
Seguimiento + refrigeración activa	30-40%

Nota. Datos adaptados de (Gupta & Mehra, 2018),

Wang et al. (2020), destacan cómo los sistemas de seguimiento solar pueden optimizar la eficiencia de las células perovskita, un avance crucial debido a la sensibilidad de estas células a la luz directa. Según su estudio, un sistema de seguimiento bien diseñado puede incrementar la eficiencia de estas células hasta en un 20%. Este desarrollo subraya el impacto positivo de combinar materiales avanzados como las células perovskitas con tecnologías de seguimiento, maximizando la captación de energía y marcando un avance importante en la tecnología fotovoltaica.

Jones y Li (2022) abordan una perspectiva complementaria al explorar el potencial de los sistemas de seguimiento solar en las células solares sensibilizadas por colorante (DSSC). Estas células son especialmente efectivas en condiciones de luz difusa, características de climas nublados o de baja radiación. Los autores demuestran que los sistemas de seguimiento, al ajustar constantemente la orientación de los paneles, optimizan la captación de luz difusa, aumentando la producción de energía en estas circunstancias.

Hossain y Rahman (2020) presentan un enfoque innovador al integrar redes eléctricas inteligentes con sistemas de seguimiento solar. Su investigación combina modelos dinámicos que ajustan los paneles en función de la demanda energética y las condiciones climáticas, lo que permite optimizar la gestión de la energía a nivel de red eléctrica. Este enfoque es particularmente relevante en entornos urbanos y rurales, ya que mejora la eficiencia general del sistema solar y facilita una distribución energética más equilibrada.

El informe de *SEIA (2023)* resalta cómo los grandes proyectos solares en Estados Unidos están adoptando sistemas de seguimiento solar combinados con tecnologías de monitoreo dinámico. Este enfoque está revolucionando las instalaciones a gran escala, superando las limitaciones de los sistemas fijos tradicionales y maximizando la producción de energía en plantas solares, lo que representa una tendencia clave en el mercado.

En el ámbito de la investigación experimental, *Chowdhury et al. (2021)* proponen algoritmos avanzados de seguimiento solar basados en inteligencia artificial. Estos algoritmos mejoran la previsión del movimiento solar y optimizan los ajustes en tiempo real, aumentando la captación de energía y reduciendo los tiempos de inactividad de los paneles. Este uso de IA añade una capa de inteligencia y eficiencia a los sistemas de seguimiento, consolidando su papel en la próxima generación de tecnologías fotovoltaicas.

Finalmente, *Perez et al. (2021)* presentan un enfoque centrado en la optimización estacional de los ángulos de inclinación de los paneles solares. Utilizando modelos dinámicos que ajustan automáticamente la inclinación según las estaciones del año, logran maximizar la exposición solar en latitudes con variaciones significativas en la inclinación solar. Este desarrollo resulta especialmente útil para incrementar la eficiencia energética en regiones con variaciones estacionales marcadas, asegurando un rendimiento óptimo durante todo el año.

Innovaciones en el Diseño de Células y Paneles Solares

Las innovaciones en el diseño de células y paneles solares han sido exploradas a través de una amplia gama de estudios recientes que destacan avances significativos en la tecnología fotovoltaica. Estos desarrollos abarcan desde la introducción de nuevos materiales y estructuras hasta la optimización de procesos de fabricación. Los avances en el diseño de las células solares no solo han incrementado la eficiencia energética de los sistemas fotovoltaicos, sino que también

han permitido reducir los costos y aumentar la versatilidad de las aplicaciones solares en diversos entornos y condiciones climáticas.

Sarkar et al. (2023) exploran la modelación matemática de los módulos fotovoltaicos utilizando Simulink, un software clave para predecir el comportamiento de las células solares bajo diferentes condiciones ambientales. Resulta interesante cómo este tipo de modelación permite ajustar las configuraciones de los paneles solares en tiempo real, mejorando así la eficiencia del sistema. Su investigación subraya la importancia de contar con herramientas predictivas avanzadas para maximizar la captación de energía y optimizar el diseño de las células solares. En la tabla 7 se presentan los valores estándar de parámetros eléctricos y físicos de las células de silicio utilizadas en paneles solares. El modelo se basa en la ecuación característica de la célula solar, que es una ecuación no lineal que relaciona la corriente (I), el voltaje (V) y otros parámetros del sistema:

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{nKT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

I_0

I_{ph} : es la corriente de foto-generación.

I_0 es la corriente de saturación inversa.

q es la carga del electrón (1.6×10^{-19} C).

n es el factor de idealidad de la célula.

k es la constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K).

T es la temperatura en Kelvin.

R_s es la resistencia serie.

R_{sh} es la resistencia shunt.

Tabla 7*Valores Típicos de Parámetros para Células de Silicio*

Parámetro	Descripción	Valor Típico
I _{ph}	Corriente de foto-generación	5 A
I ₀	Corriente de saturación inversa	10 ⁻¹⁰ A
N	Factor de idealidad	1.3
R _s	Resistencia serie	0.01 Ω
R _{sh}	Resistencia shunt	1000 Ω

Nota. Datos adaptados de (Sarkar et al., 2023).

Uno de los trabajos más recientes y reveladores es el de Park et al. (2021), que examina el desarrollo de las células solares perovskita y los avances en células multijuntura. Este estudio profundiza en las innovaciones en los materiales fotovoltaicos que han permitido a las células perovskitas alcanzar niveles de eficiencia comparables a los del silicio, pero con costos de producción considerablemente menores. Además, el artículo resalta cómo las células multijuntura permiten capturar diferentes partes del espectro solar, optimizando la conversión de energía. Lo que más destaca para mí es el potencial que tienen las células perovskitas para revolucionar la industria solar, al ser materiales más versátiles y fáciles de producir en masa, lo que podría reducir significativamente el coste de la energía solar en los próximos años (Park et al., 2021). La eficiencia de conversión de una célula solar puede expresarse con la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} * 100$$

Donde:

η es la eficiencia de la célula.

P_{max} es la potencia máxima generada por la célula.

P_{in} es la potencia de irradiancia incidente.

El estudio destaca cómo las células solares multijuntura, que utilizan diferentes capas de materiales para capturar distintas longitudes de onda de la luz solar, pueden mejorar la eficiencia.

$$\eta_{total} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \eta_i)$$

12

η_{total} es la eficiencia total de la célula multijuntura.

η_i es la eficiencia de cada capa individual.

n es el número de capas.

Shen et al. (2020) amplían esta discusión con un análisis detallado de los avances en la fabricación de células solares de silicio, que siguen dominando el mercado fotovoltaico. Ellos exploran cómo la automatización y la integración de nuevas tecnologías han permitido mejorar la eficiencia de las células de heterounión (HJT), un tipo de célula solar que combina diferentes materiales para aumentar el rendimiento sin incrementar significativamente los costos de producción. Estos avances son fundamentales para hacer que las tecnologías solares sean más accesibles y escalables.

Por otro lado, Narvaez et al. (2023). Destacan la importancia de diseñar células solares que puedan adaptarse a las fluctuaciones climáticas. Su investigación analiza cómo los diseños estructurales innovadores, como las células solares flexibles, pueden mitigar los efectos adversos de condiciones ambientales extremas, como altas temperaturas o fuertes vientos. Este tipo de

flexibilidad en el diseño es crucial para extender la aplicación de las tecnologías solares a una mayor variedad de entornos.

En cuanto a las innovaciones en refrigeración, Gupta y Mehra (2018) proponen el uso de tecnologías de refrigeración activa para mejorar la eficiencia de las células solares, especialmente en climas cálidos. Su enfoque combina sistemas de refrigeración con paneles solares diseñados para operar a temperaturas más bajas, lo que ayuda a mantener la eficiencia energética. Este tipo de innovación es clave para maximizar el rendimiento en regiones donde las altas temperaturas pueden afectar negativamente la eficiencia de las células solares.

Otro artículo interesante es el de Feng y Li (2019), quienes proponen soluciones para mejorar el rendimiento de las células solares en climas extremos mediante el uso de diseños bifaciales y recubrimientos reflectantes. Las células bifaciales permiten que ambos lados del panel capturen luz solar, lo que puede aumentar significativamente la producción de energía, especialmente en áreas con superficies reflectantes como la nieve o el agua. Este enfoque me parece particularmente relevante para las aplicaciones solares en regiones polares o desérticas, donde las condiciones climáticas extremas representan un reto constante.

El trabajo de Wang et al. (2020) sobre las células solares perovskita también ofrece un análisis profundo de cómo la estructura de estas células ha sido optimizada para mejorar la captación de luz solar. Las células perovskitas han mostrado un progreso notable en términos de eficiencia y estabilidad, lo que las convierte en una tecnología prometedora para el futuro. Las células perovskita son un excelente ejemplo de cómo los avances en el diseño de materiales pueden llevar a un aumento significativo en la eficiencia energética de los sistemas fotovoltaicos.

Por otro lado, Jones y Li (2022) se centran en la ingeniería de las células fotovoltaicas de película delgada, que son más económicas y flexibles que las células de silicio tradicionales.

Aunque estas células tienen una eficiencia menor, su bajo costo y flexibilidad las hacen ideales para aplicaciones en techos y superficies irregulares. Lo que más llama la atención de este estudio es cómo las células de película delgada amplían el alcance de la energía solar en aplicaciones donde las tecnologías tradicionales no son viables.

Jones y Li (2022) discuten el diseño de células solares sensibilizadas por colorante (DSSC), que son particularmente útiles en condiciones de baja radiación solar o luz difusa. Este tipo de tecnología me parece especialmente adecuada para aplicaciones en climas nublados o áreas con baja irradiancia, donde las células solares tradicionales no pueden alcanzar su máximo potencial.

Además, el uso de la inteligencia artificial en el diseño de células solares, según Chowdhury et al. (2021), es un avance clave en la optimización de las configuraciones estructurales de los paneles solares. Ellos exploran cómo la IA puede ayudar a ajustar dinámicamente los ángulos de las capas y las configuraciones de los materiales, lo que permite maximizar la eficiencia en tiempo real. Este enfoque tiene el potencial de revolucionar el campo de la energía solar, al permitir que los sistemas solares se adapten mejor a las variaciones ambientales.

Finalmente, el informe de SEIA (2023) destaca cómo las grandes instalaciones solares en Estados Unidos están adoptando diseños innovadores como las células solares bifaciales y células de alta eficiencia. Estas tecnologías están ayudando a maximizar la captación de luz solar y reducir los costos operativos, lo que es esencial para que la energía solar continúe creciendo a escala global. Como podemos observar en la tabla 8 se genera una comparación de las eficiencias, ventajas y limitaciones de tecnologías fotovoltaicas como silicio, células perovskita y células multijuntura.

Tabla 8*Comparación de Eficiencias de Diferentes Tipos de Células Solares*

Tipo de Célula	Eficiencia (%)	Ventajas
Silicio	18-22	Alta disponibilidad, estabilidad
Perovskita	20-25	Bajo costo, alta eficiencia potencial
Multijuntura	30-40	Alta eficiencia, captura de espectro amplio

Nota. Datos adaptados de (SEIA, 2023)

Avances en Técnicas Basadas en Espejos y Concentradores

Los avances en técnicas de paneles solares que emplean espejos y concentradores reflejan una innovación significativa para maximizar la captación de energía solar. Estas tecnologías son ideales para incrementar la eficiencia de los paneles fotovoltaicos y optimizar la cantidad de energía captada por superficie. A continuación, se describen estas técnicas, incluyendo referencias bajo el formato APA.

Beneficios y Desafíos

Beneficios:

Incremento de la eficiencia energética en un rango del 20-40%, dependiendo de la técnica utilizada (Fraunhofer ISE, 2023; SEIA, 2023).

Reducción de la cantidad de paneles necesarios, lo que optimiza el uso del espacio disponible.

Mejora en la rentabilidad de proyectos solares a gran escala.

Desafíos:

Costos iniciales elevados para sistemas avanzados, como el seguimiento y los CPV.

Necesidad de mantener el sistema libre de polvo y daños mecánicos.

Requerimientos adicionales de enfriamiento para mitigar el calor excesivo generado por la concentración de luz (Karlsruher Institut für Technologie, 2022; MDPI, 2022).

Técnicas Basadas en Espejos y Concentradores

Espejos Reflectores. Esta técnica utiliza espejos planos para redirigir la luz solar hacia los paneles fotovoltaicos, aumentando la intensidad de radiación recibida. Estudios recientes han demostrado que los sistemas con espejos pueden incrementar la producción de energía en hasta un 20% en comparación con sistemas sin concentración, aunque esto depende de las condiciones climáticas y la calidad del diseño (Fraunhofer ISE, 2023; Global Market Insights, 2023).

Sistemas de Seguimiento con Espejos. Los sistemas de seguimiento solar integrados con espejos ajustan su orientación para capturar la máxima cantidad de luz solar durante el día. Estos sistemas, aunque costosos en términos iniciales, son efectivos para regiones con alta radiación solar directa y pueden aumentar significativamente la eficiencia operativa (SEIA, 2023; Jones y Li, 2022).

Concentradores Fotovoltaicos (CPV). Los concentradores fotovoltaicos utilizan espejos curvos o lentes para concentrar la luz solar sobre pequeñas células fotovoltaicas de alta eficiencia. Este diseño es adecuado para regiones con abundante luz solar directa, aunque requiere enfriamiento adecuado para evitar sobrecalentamientos que podrían reducir la eficiencia o dañar los paneles (Karlsruher Institut für Technologie, 2022; MDPI, 2022).

Sistemas de Difusión de Luz. Los espejos difusores están diseñados para distribuir uniformemente la luz solar, minimizando puntos calientes y protegiendo los paneles de daños localizados. Este enfoque es particularmente útil en regiones con alta irradiación, pero no siempre óptimas condiciones atmosféricas Solar (Magazine, 2022).

Tecnologías Fotovoltaicas Disponibles en los Mercados

Las tecnologías fotovoltaicas han emergido como una de las soluciones más prometedoras para el aprovechamiento de fuentes de energía renovable. En los mercados actuales, existe una amplia gama de opciones que varían en eficiencia, costo y aplicaciones específicas. Desde paneles de silicio cristalino, líderes en el sector, hasta innovaciones como los paneles de película delgada y tecnologías emergentes perovskita, cada avance refleja el esfuerzo por optimizar el rendimiento energético y reducir el impacto ambiental. Este panorama diverso ofrece oportunidades significativas para satisfacer la creciente demanda de energía limpia a nivel global.

Silicio Monocristalino (Mono-Si)

La investigación sobre los paneles solares de silicio monocristalino (Mono-Si) confirma que esta tecnología se ha consolidado como un estándar de excelencia dentro de la industria fotovoltaica debido a su elevada eficiencia energética, que generalmente oscila entre el 20 % y el 22 %, con modelos avanzados alcanzando hasta el 24 % (Fraunhofer ISE, 2023; Park et al., 2021). Esta notable eficiencia se debe a la alta pureza del material y al diseño uniforme de las celdas, factores que optimizan la conversión de la luz solar en energía eléctrica, incluso en condiciones de baja irradiancia.

Entre las ventajas más destacadas del silicio monocristalino está su longevidad, con una vida útil promedio superior a los 25 años, acompañada de una degradación anual inferior al 0.5 %. Esto lo convierte en una opción preferida tanto para instalaciones residenciales como comerciales de gran escala, dado que ofrece retornos sostenidos sobre la inversión inicial (Global Market Insights, 2023). Asimismo, las innovaciones recientes, como las celdas PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) y TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact), han permitido aumentar

aún más la eficiencia y reducir las pérdidas energéticas, consolidando su posición en el mercado (Ahmed et al., 2023; Jones y Li, 2022).

Sin embargo, esta tecnología también enfrenta limitaciones importantes, entre las cuales destaca su elevado costo inicial en comparación con otras alternativas como los paneles policristalinos o de película delgada. Este costo está asociado al proceso de fabricación, que requiere temperaturas altas y un consumo energético considerable para la producción de lingotes de silicio monocristalino (SEIA, 2023). Adicionalmente, los paneles Mono-Si presentan una sensibilidad significativa a las sombras parciales, lo que puede afectar negativamente su desempeño en ubicaciones con obstrucciones como árboles o edificios cercanos. No obstante, la introducción de tecnologías complementarias como optimizadores de potencia y microinversores ha mitigado este problema.

En cuanto a la sostenibilidad, aunque el silicio monocristalino tiene un impacto ambiental inicial más alto debido a la energía necesaria para su fabricación, su eficiencia energética y longevidad permiten compensar esta huella durante su ciclo de vida, logrando un retorno energético notablemente rápido en comparación con otras tecnologías Fraunhofer (ISE, 2023). Además, la transición hacia procesos de fabricación más sostenibles, como el uso de energías renovables en las fábricas, está ayudando a reducir aún más su impacto ambiental.

Los avances tecnológicos continúan ampliando el potencial de esta tecnología. Por ejemplo, los paneles bifaciales Mono-Si, que capturan luz tanto en el lado frontal como en el trasero, están ganando popularidad, especialmente en instalaciones a gran escala en terrenos reflectantes como desiertos o regiones cubiertas de nieve. Este diseño no solo incrementa la generación de energía, sino que también mejora la adaptabilidad a diferentes entornos

geográficos, lo que es crucial para diversificar las aplicaciones de la energía solar. Como podemos observar en la tabla 9 estas son algunas ventajas y algunas desventajas

Tabla 9

Ventajas y Desventajas de Silicio Monocristalino

Ventajas	Desventajas
Alta eficiencia energética: Los paneles monocristalinos tienen eficiencias que oscilan entre el 15% y el 22%, lo que los convierte en la opción más eficiente en el mercado actual. Esto los hace ideales para áreas con espacio limitado, ya que generan más energía por unidad de superficie.	Costo elevado: El proceso de fabricación utiliza el método Czochralski, que requiere altos niveles de pureza y energía, aumentando significativamente los costos de producción.
Larga vida útil: Estos paneles suelen ofrecer una garantía de desempeño de más de 25 años, y en muchos casos, mantienen su eficiencia operativa hasta por 30 años.	Reducción de eficiencia con temperaturas altas: Aunque son más eficientes en general, su rendimiento puede disminuir hasta un 15% en climas muy cálidos debido al aumento de temperatura.
Mejor rendimiento en condiciones de baja irradiancia: Son altamente eficientes incluso en días nublados o durante las primeras y últimas horas del día, asegurando una captación continua de energía.	Impacto ambiental en fabricación: El proceso de producción de células monocristalinas requiere un uso intensivo de energía y genera desechos tóxicos como subproductos.

Nota. Autoría propia

Este tipo de paneles los podemos encontrar en diferentes páginas de mercadeo WEB como, por ejemplo:

- Emergente. (n.d.). Los mejores productos de energía solar | Compra online o cotiza. 2024, de <https://www.emergente.com.co/tienda-energia-solar>
- Ineldec. (n.d.). Tienda de energía solar. 2024, de <https://ineldec.com>
- AutoSolar. (n.d.). Panel Solar Pequeño 210W 12V Monocristalino Restar Solar. 2024, de <https://autosolar.com>
- Energía Solar Colombia. (n.d.). Panel Solar LONGI Módulo Fotovoltaico LR5-72HPH 555W., de <https://energiasolarcolombia.com>

Silicio Policristalino (Poly-Si)

Los paneles solares de silicio policristalino (Poly-Si) destacan como una solución económica y eficiente en proyectos fotovoltaicos. Esta tecnología se caracteriza por estar fabricada a partir de múltiples cristales de silicio fundidos en una sola oblea, un método de producción más simple y menos costoso que el empleado para los paneles monocristalinos, lo que los convierte en una opción accesible para diversas aplicaciones Solar (Power World, 2023).

Los paneles policristalinos presentan eficiencias que oscilan entre el 14 % y el 17 %, dependiendo de las condiciones operativas y el diseño del sistema. Aunque este rango de eficiencia es ligeramente inferior al de los paneles monocristalinos, resulta adecuado para muchas aplicaciones residenciales y comerciales. Además, su menor costo inicial y un proceso de fabricación más sostenible los posicionan como una opción atractiva para proyectos de gran escala o en regiones con presupuestos limitados (Solarti, 2023; Magazine, 2023).

Sin embargo, esta tecnología tiene algunas limitaciones importantes. Por ejemplo, su desempeño puede verse más afectado por temperaturas elevadas en comparación con otras

tecnologías, lo que sugiere que su aplicación ideal está en regiones de clima moderado y donde el espacio no sea una restricción significativa Solar (Power World, 2023).

En términos de relación costo-beneficio, los paneles de silicio policristalino ofrecen una solución económica sin comprometer de manera significativa la calidad. Aunque no alcanzan las cifras de eficiencia de los paneles de silicio monocristalino, su desempeño es suficiente para satisfacer las demandas energéticas en numerosos contextos, lo que los convierte en una alternativa viable para quienes priorizan el presupuesto. Como podemos observar en la tabla 10 estas son algunas ventajas y algunas desventajas.

Tabla 10

Ventajas y Desventajas de Silicio Policristalino

Ventajas	Desventajas
Costo más accesible: Los paneles policristalinos son más económicos debido a un proceso de fabricación menos complejo que no requiere monocristales de silicio puro.	Menor eficiencia: Su rango de eficiencia varía entre el 13% y el 16%, lo que significa que requieren más espacio para generar la misma cantidad de energía que los monocristalinos.
Fabricación más rápida y menos intensiva energéticamente: La formación de cristales múltiples permite una mayor velocidad de producción y menor consumo energético durante su creación.	Vida útil ligeramente menor: Aunque aún son duraderos, su tiempo de operación promedio se encuentra entre 20 y 25 años, ligeramente inferior al de los monocristalinos.
Mejor rendimiento en temperaturas más altas: Aunque menos eficiente, su rendimiento es	Aspecto estético menos uniforme: El color azul moteado puede ser menos atractivo para

más estable en climas cálidos, con menor caída de eficiencia a altas temperaturas. instalaciones donde el diseño estético es prioritario.

Nota. Autoría propia

Este tipo de paneles los podemos encontrar en diferentes páginas de mercadeo WEB como, por ejemplo:

- Emergente. (n.d.). Los mejores productos de energía solar | Compra online o cotiza. 2024, de <https://www.emergente.com.co/tienda-energia-solar>
- Ineldec. (n.d.). Tienda de energía solar. 2024, de <https://ineldec.com>
- AutoSolar. (n.d.). Panel Solar Pequeño 150W 12V Policristalino EcoGreen |. 2024, de <https://autosolar.com>

Células Fotovoltaicas de Película Delgada

En el análisis sobre los paneles solares de película delgada, se puede afirmar que esta tecnología ha mostrado avances significativos en los últimos años, especialmente en términos de accesibilidad y adaptabilidad. Al haber revisado investigaciones recientes que subrayan sus características distintivas, como su diseño ligero y flexible, lo que les permite ser instalados en superficies no convencionales y en aplicaciones móviles. Esto contrasta con las células de silicio tradicionales, que suelen ser más pesadas y menos adaptables a diversas superficies (Karlsruher Institut für Technologie, 2022; Solvoltaics, 2022).

Una de las principales ventajas que percibo en estas células es su menor costo de producción, gracias a un proceso de fabricación menos intensivo en energía. Esto hace que sean una opción económica para proyectos de gran escala o en regiones donde los recursos financieros son limitados. Sin embargo, uno de los desafíos más notorios es su eficiencia, que generalmente oscila entre 11% y 12%, comparada con el 15%-20% de las tecnologías tradicionales de silicio.

Este aspecto implica la necesidad de mayores superficies para alcanzar los mismos niveles de generación de energía, lo que puede limitar su implementación en espacios reducidos (MDPI, 2022).

Lo que considero particularmente prometedor es el desarrollo de materiales avanzados como el sulfuro de estaño (SnS), que no solo mejora la sostenibilidad de la producción, sino que también apunta a aumentar la durabilidad de los paneles en escenarios desfavorables. Además, los avances en combinaciones híbridas, como las células tandem, han permitido ampliar el espectro de luz capturada, mejorando la eficiencia y reduciendo las limitaciones actuales (Solar Magazine, 2022).

Estos avances no solo demuestran el potencial de la tecnología de película delgada, sino que también reflejan una tendencia hacia la sostenibilidad y la democratización del acceso a la energía solar. La investigación futura debería centrarse en abordar los desafíos de durabilidad y eficiencia, permitiendo que esta tecnología se consolide como una opción viable y competitiva en el mercado energético global. Como podemos observar en la tabla 11 estas son algunas ventajas y algunas desventajas.

Tabla 11

Ventajas y Desventajas de Células Fotovoltaicas de Película Delgada

Ventajas	Desventajas
Flexibilidad y versatilidad: Estos paneles son extremadamente delgados (algunos con un grosor menor a 1 mm), lo que los hace ideales para aplicaciones en superficies curvas, fachadas o vehículos eléctricos.	Baja eficiencia: Su rango de eficiencia es significativamente menor (11% a 13%), lo que los hace menos adecuados para áreas con espacio limitado o alta demanda energética.

<p>Menor costo de producción y bajo impacto ambiental: Requieren menos materiales y procesos industriales menos intensivos, lo que disminuye el impacto ambiental y reduce costos.</p> <p>Adecuados para climas con luz difusa: Funcionan bien en condiciones de poca luz o cielos nublados, lo que los convierte en una opción viable para entornos urbanos o regiones con alta nubosidad.</p>	<p>Mayor espacio requerido: Debido a su baja eficiencia, se necesita más superficie para producir la misma cantidad de energía que los paneles de silicio cristalino.</p> <p>Problemas de durabilidad: Tienen una vida útil más corta y son más susceptibles a degradarse con el tiempo, especialmente en condiciones climáticas extremas.</p>
---	--

Nota. Autoría propia

Este tipo de paneles los podemos encontrar en diferentes páginas de mercadeo WEB como, por ejemplo:

- SFE Solar. (n.d.). Paneles solares de capa fina. <https://www.sfe-solar.com/instalaciones-fotovoltaicas/productos/paneles-solares/capa-fina/>

Comparación de las Tecnologías Disponibles en el Mercado

La tabla 9 detalla características, beneficios y desventajas de tecnologías como los paneles monocristalinos, policristalinos y de película delgada. La tabla presentada ofrece una comparación detallada entre las principales tecnologías de paneles solares disponibles en el mercado, incluyendo sus características técnicas, beneficios, desventajas y costos aproximados. La información se organiza de manera sistemática para facilitar el análisis y la toma de decisiones, especialmente para proyectos de energía solar que busquen balancear eficiencia, costos y sostenibilidad ambiental.

El contenido de la tabla incluye tanto tecnologías tradicionales como los paneles monocristalinos y policristalinos, ampliamente utilizados debido a su rendimiento y accesibilidad, como opciones más innovadoras, tales como los paneles de película delgada, los concentradores con espejos y sistemas de enfriamiento. Además, se incorporan elementos complementarios como los seguidores solares, que optimizan la captación de luz, y tecnologías de refrigeración, diseñadas para mejorar la eficiencia en climas extremos.

La relevancia de esta tabla radica en que permite visualizar las fortalezas y limitaciones de cada opción tecnológica, ayudando a identificar soluciones específicas según las condiciones del proyecto, como disponibilidad de espacio, presupuesto y requerimientos energéticos. Al mismo tiempo, destaca el costo estimado en pesos colombianos para las tecnologías principales, proporcionando una referencia económica útil para el contexto local.

Tabla 12

Comparación de las Tecnologías de Paneles Solares

Tecnología o Técnica	Características	Beneficios	Desventajas	Costo Aproximado por Unidad (COP)
Monocristalino	Un único cristal de silicio puro. Alta eficiencia (15%-22%). Color uniforme negro o azul	Alta eficiencia de conversión. Requieren menos espacio. Larga vida útil (25+ años).	Alto costo inicial. Menor rendimiento a altas temperaturas.	615,938 COP por panel de 340 W

	oscuro.	Mejor	Impacto	
	Ideal para techos con espacio limitado.	rendimiento en baja luz.	ambiental significativo en fabricación.	
		Compatible con técnicas avanzadas.		
	Compuesto de múltiples cristales de silicio.	Más económico que monocristalino.		
	Eficiencia media (13%-16%).	Buen desempeño en climas cálidos.	Menor eficiencia.	434,000 COP
Policristalino	Color azul moteado.	Proceso menos intensivo.	Requiere más espacio.	por panel de 340 W
	Fabricación más económica y rápida.	Mayor accesibilidad para proyectos residenciales.	Menor vida útil (20-25 años).	
	Capas delgadas de CdTe, CIGS o silicio amorfo.	Flexibles y ligeros.	Baja eficiencia.	
	Baja eficiencia (11%-13%).	Bajo costo de producción.	Durabilidad limitada.	1,502,974 COP por panel 300W
Película Delgada	Flexibles y ligeros.	Ideales para fachadas y	Materiales tóxicos como el cadmio en	

	Ideales para climas difusos o nublados.	arquitectura urbana.	ciertos modelos.	
		Menor impacto ambiental en fabricación.		
		Aumentan la generación diaria.		
		Los seguidores solares pueden aumentar la eficiencia de los paneles hasta un 30%	Alto costo inicial.	
Seguidores Solares	Ajustan el ángulo de los paneles para seguir el sol.	Incrementan eficiencia hasta 30%.	Mayor mantenimiento. Requiere terrenos planos.	Desconocido por sistema.
		Mejora del retorno de inversión a largo plazo.	Menor eficiencia en condiciones de viento extremo o nieve.	
		Optimización en zonas de alta irradiación solar.		

		Mejora de eficiencia a temperaturas altas. Se estima que puede mejorar la eficiencia en aproximadamente 5%-10% dependiendo del material y del diseño empleado. Bajo costo operativo. Extiende la vida útil de los paneles.	Dependencia de condiciones ambientales. Requiere diseños adicionales en paneles. Limitado en climas con alta humedad.	
Enfriamiento Pasivo	Reflectores o recubrimientos especiales para disipar el calor. Uso de materiales conductores térmicos para mitigar sobrecalentamiento.			Desconocido por sistema.
Refrigeración Activa	Sistemas mecánicos como ventiladores o enfriadores líquidos para regular la	Máxima eficiencia en climas extremos. Este sistema puede incrementar la	Altos costos operativos. Requiere energía adicional para operar.	Desconocido por sistema.

	temperatura del panel.	eficiencia hasta un 15%-20% en condiciones extremas de calor	Mayor complejidad en instalación y mantenimiento.	
		Control preciso de temperatura.		
		Reduce degradación térmica de los materiales fotovoltaicos.		
		Alta generación de energía.	Necesita mecanismos de enfriamiento.	
Concentradores con Espejos	Usan espejos o lentes para enfocar más luz sobre los paneles. Incrementan la irradiación efectiva sobre las células solares.	Incrementan la irradiación efectiva y, en consecuencia, la producción puede aumentar en un rango de 40%-80% .	Alta dependencia de condiciones climáticas. Costos adicionales en espejos y mantenimiento.	Desconocido por sistema.
		Reduce necesidad de		

múltiples
paneles.
Compatible con
tecnología
monocristalina y
policristalina.

Nota. Autoría propia

Los paneles solares monocristalinos ofrecen una alta eficiencia (15% -22%) y son ideales para áreas con espacio limitado. Aunque su costo inicial es más alto, tienen una vida útil de más de 25 años y funcionan bien en condiciones de baja luz. Dependiendo de la capacidad y fabricante.

Más información se encuentra en [Autosolar](#).

Autosolar. (n.d.). Paneles solares monocristalinos. <https://autosolar.co/paneles-solares-24v/panel-solar-340w-24v-monocristalino-perc-ja-solar>

Los paneles policristalinos son más accesibles económicamente. Aunque tienen una menor eficiencia (13%-16%), son ideales para proyectos a gran escala con amplio espacio disponible. Encuentra opciones en [Autosolar](#).

Autosolar. (n.d.). Paneles solares policristalinos. <https://autosolar.com>

Emergente. (n.d.). Panel solar de 340W policristalino Ecogreen. <https://www.emergente.com.co/producto/panel-solar-de-340w-policristalino-ecogreen>

Los paneles de película delgada son flexibles y ligeros, lo que los hace adecuados para aplicaciones en fachadas, pisos y superficies curvas. Aunque tienen menor eficiencia (11% - 13%), son ideales en climas nublados. Consulta más detalles en [SunFields](#).

SunFields. (n.d.). Placas solares para pisos. <https://www.sunfields.es>

AliExpress. (n.d.). Panel de 300W película delgada.

https://es.aliexpress.com/item/1005005699070995.html?aff_platform=true&aff_short_key=UnejMJZVf&isdl=y&src=bing&albch=shopping&acnt=135095331&isdl=y&albcpr=555157127&albag=1310619016253918&slnk=&trgt=pla-4585513252419848&plac=&crea=81913744742423&netw=o&device=c&mtctp=e&utm_source=Bing&utm_medium=shopping&utm_campaign=PA_Bing_CO_PLA_PC%2FM_ALL_20241030_Others&utm_content=ALL&utm_term=paneles%20de%20pelicula%20delgada%20%2B&msclkid=9bae38ecfa99120339565fbedaca935f, panel de 300 W

Los sistemas de seguimiento solar aumentan la eficiencia de los paneles en un 20%-30% al ajustar su orientación según la posición del sol. Los precios para un sistema de 2 ejes, como el ofrecido por Solenersa, dependiendo de la capacidad y diseño. Más información en [Solenersa](#).

Discusión

El desempeño de las tecnologías fotovoltaicas en aplicaciones residenciales está intrínsecamente relacionado con las características climáticas locales, como las observadas en regiones específicas de Colombia, como Bogotá y la costa. Basarse en datos climáticos locales permite identificar soluciones energéticas adaptadas a las necesidades y limitaciones específicas de cada zona, promoviendo la eficiencia y la sostenibilidad.

En el mercado colombiano, la disponibilidad de tecnologías como paneles monocristalinos y policristalinos está en crecimiento, con opciones que varían en precio y especificaciones técnicas. Integrar soluciones locales y sostenibles, como materiales de bajo impacto ambiental y proveedores nacionales, podría no solo reducir costos logísticos sino también fortalecer la economía local.

En conclusión, las tecnologías fotovoltaicas ofrecen un potencial significativo para aplicaciones residenciales en Colombia. Sin embargo, optimizar su implementación requiere un enfoque personalizado que considere tanto las condiciones climáticas locales como las necesidades económicas y sociales de los usuarios. Este enfoque garantiza una transición energética eficiente y sostenible para el país.

Aplicaciones Residenciales en Bogotá

En Bogotá, el clima templado y las temperaturas bajas (entre 8 °C y 20 °C) benefician particularmente a los paneles solares monocristalinos. Por ejemplo, un techo residencial promedio de 50 m² equipado con paneles monocristalinos podría generar aproximadamente 8.5 kWh diarios, cubriendo gran parte de las necesidades energéticas de un hogar típico, lo que resalta su eficacia bajo las condiciones climáticas locales. Su alta eficiencia en condiciones de baja irradiancia y luz difusa los hace ideales para techos residenciales, donde el espacio puede

ser limitado. Aunque los paneles policristalinos representan una opción más económica, su menor eficiencia implica que se requeriría un mayor número de paneles para igualar la producción de energía de los monocristalinos, lo cual puede no ser práctico en entornos urbanos densos. Por ejemplo, un techo de 50 m² en Bogotá equipado con paneles monocristalinos podría generar hasta 8.5 kWh diarios, mientras que el mismo espacio con policristalinos solo produciría aproximadamente 7 kWh diarios, requiriendo mayor inversión en infraestructura.

Desempeño en Bogotá Enfocado a la Temperatura

Bogotá, al tener un clima templado y frío con temperaturas promedio que oscilan entre los 8 °C y 20 °C, proporciona un entorno óptimo para la instalación de sistemas fotovoltaicos. Este rango de temperatura beneficia tanto a los paneles solares monocristalinos (Mono-Si) como a los policristalinos (Poly-Si), ya que las pérdidas por calor son mínimas en comparación con regiones más cálidas. Sin embargo, se pueden identificar diferencias importantes en el desempeño de ambos tipos de paneles en las condiciones específicas de Bogotá.

Clima e Irradiancia Solar en Bogotá

Bogotá, al ubicarse cerca del ecuador y a una altitud promedio de 2,640 metros sobre el nivel del mar, experimenta niveles moderados de irradiancia solar, aunque con variabilidad debido a los días nublados y la presencia de temporadas lluviosas. En promedio, la ciudad recibe entre 4 y 5 kWh/m² diarios de radiación solar, lo cual es suficiente para garantizar un rendimiento aceptable de los paneles solares, pero no tan alto como en regiones de mayor insolación. Este nivel de radiación, combinado con la altitud, hace que las temperaturas superficiales de los paneles se mantengan bajas, lo que es ideal para evitar pérdidas significativas por calor.

Desempeño de los Paneles Solares en Bogotá

Los paneles solares monocristalinos, conocidos por su alta eficiencia, destacan en condiciones de baja irradiancia como las que se presentan en Bogotá, donde los días nublados son frecuentes. Gracias a su diseño uniforme, estos paneles tienen la capacidad de captar y convertir la luz difusa de manera más efectiva que los policristalinos, lo que los hace ideales para maximizar la generación de energía en entornos con menor intensidad solar directa. Una de las características técnicas más notables de los monocristalinos es su bajo coeficiente de temperatura, cercano al 0.3 %/°C, lo que significa que su desempeño se ve afectado mínimamente por los incrementos de temperatura. Si bien en climas cálidos esta ventaja es crucial, en una ciudad como Bogotá, donde las temperaturas son frescas y oscilan entre 8 °C y 20 °C durante todo el año, este factor no representa un desafío significativo. No obstante, su capacidad para operar eficientemente incluso en condiciones adversas, como la baja irradiancia y la dispersión de luz solar, los posiciona como una opción preferida para proyectos fotovoltaicos en regiones templadas y con variabilidad climática, garantizando una producción energética confiable y sostenida.

$$\eta_T = \eta_0 [1 - \beta(T - T_{ref})]$$

Donde:

η_{ref} : Eficiencia nominal del panel (Monocristalino: 20%).

β : Coeficiente de temperatura (Monocristalino: 0.3%/°C).

T: Temperatura ambiente (usaremos el promedio de Bogotá, 14 °C)

T_{ref} : Temperatura de referencia (25 °C).

η_T : Eficiencia a temperatura T.

$$\eta_T = 0.20[1 - 0.003(14 - 25)]$$

$$\eta_T = 0.20[1 - 0.033]$$

$$\eta_T = 0.2066$$

$$\eta_T = 20.66\%$$

$$P = A * G * \eta_T$$

A: Área del panel (por ejemplo, 1.6 m² para un panel estándar).

G: Irradiancia promedio en Bogotá (450W/m²)

$$P = 1.6 * 450 * 0.2066$$

$$P = 148.75W$$

Los paneles solares policristalinos, aunque presentan una eficiencia ligeramente inferior, entre el 14 % y el 17 %, se destacan por ser una alternativa más económica y de fabricación menos compleja en comparación con los monocristalinos. Estas características los convierten en una opción viable y accesible para proyectos con presupuestos más ajustados, especialmente en aplicaciones donde los costos iniciales tienen un peso considerable en la toma de decisiones. A pesar de su menor eficiencia, los Poly-Si ofrecen un rendimiento adecuado en condiciones de irradiación moderada y se adaptan bien a climas donde la variación solar no es extrema. Sin embargo, su coeficiente de temperatura es más alto que el de los monocristalinos, lo que los hace más sensibles a aumentos de temperatura. En un clima templado como el de Bogotá, esta desventaja es menos pronunciada, pero en regiones más cálidas podría impactar su desempeño. Aunque los Poly-Si no logran igualar la eficiencia de los monocristalinos, su menor costo inicial y su capacidad de adaptarse a distintas condiciones climáticas los posicionan como una opción práctica para quienes priorizan el equilibrio entre costo y desempeño.

$$\eta_T = \eta_{ref}[1 - \beta(T - T_{ref})]$$

Donde:

η_{ref} : Eficiencia nominal del panel (Policristalino: 16%).

β : Coeficiente de temperatura (Policristalino: 0.4%/°C).

T: Temperatura ambiente (usaremos el promedio de Bogotá, 14 °C)

Tref: Temperatura de referencia (25 °C).

$$\eta_T = 0.16[1 - 0.004(14 - 25)]$$

$$\eta_T = 0.16[1 - 0.044]$$

$$\eta_T = 0.1664$$

$$\eta_T = 16.64\%$$

$$P = A * G * \eta_T$$

A: Área del panel (por ejemplo, 1.6 m² para un panel estándar).

G: Irradiancia promedio en Bogotá (450W/m²)

$$P = 1.6 * 450 * 0.1664$$

$$P = 119.81 \text{ W}$$

Sin embargo, en Bogotá, donde las temperaturas son estables y el espacio disponible puede ser limitado, la menor eficiencia de los Poly-Si implica que se necesitarán más paneles para generar la misma cantidad de energía que los Mono-Si, lo que podría no ser ideal en términos de diseño urbano.

Impacto del Clima de Bogotá en el Rendimiento de los Paneles

La combinación de temperaturas bajas, niveles moderados de irradiancia y luz difusa en Bogotá favorece el desempeño de ambos tipos de paneles, pero los Mono-Si destacan por su capacidad de operar de manera más eficiente bajo estas condiciones específicas:

Temperaturas bajas: Ambos tipos de paneles operan mejor en climas fríos, ya que las altas temperaturas suelen reducir su eficiencia. Sin embargo, los Mono-Si son menos afectados por los aumentos de temperatura en comparación con los Poly-Si, lo que les confiere una ventaja técnica incluso en los días más cálidos de Bogotá.

Luz difusa: Los días nublados de Bogotá favorecen a los Mono-Si debido a su mejor respuesta a la radiación solar indirecta, maximizando la generación de energía en condiciones de baja irradiancia.

Evaluación del Impacto de los Sistemas Solares en Bogotá

Bogotá presenta un clima frío de alta montaña, con nubosidad frecuente y niveles moderados de radiación solar como podemos observar en la tabla 13.

Tabla 13

Parámetros Generales de Bogotá

Parámetro	Valor en Bogotá
Temperatura media	12.9 °C
Radiación solar promedio	4.0 kWh/m ² /día (UPME, 2023)
Horas de sol mensuales	Menos de 160 h/mes
Precipitación anual	Alta (1,091 mm)

Nota. Autoría propia

Algunos datos para tener en cuenta son:

- La nubosidad constante reduce la eficiencia de los paneles solares.
- Se requiere tecnología de **paneles monocristalinos**, que tienen mejor rendimiento en condiciones de baja radiación.

- Los sistemas deben incluir **baterías de respaldo**, debido a la variabilidad en la generación.

Tabla 14*Costos Instalación y Mantenimiento en Bogotá*

Costo	Valor en Bogotá
Instalación (5 kW)	\$20 – \$25 millones COP
Mantenimiento anual	\$500.000 – \$1.000.000 COP

Nota. Autoría propia

Como podemos observar en la tabla 14 esto en un promedio del valor total este puede variar debido a diferentes factores como lo son:

- Los costos iniciales son más elevados debido a la necesidad de estructuras más resistentes a lluvias y vientos.
- Mayor inversión en baterías para garantizar estabilidad en la generación.
- Los incentivos gubernamentales pueden reducir costos a largo plazo.

También podemos tener en cuenta algunas estrategias para mejorar el desempeño de los sistemas solares fotovoltaicos como son:

- Uso de paneles monocristalinos para compensar la baja radiación.
- Instalación de inversores optimizados para baja irradiación.
- Sistemas de almacenamiento energético para asegurar suministro constante.
- Orientación y limpieza frecuente de los paneles para mejorar captación.

Sistemas de Refrigeración en Bogotá

En Bogotá, los sistemas de refrigeración para paneles solares no son necesarios debido al clima fresco y la ausencia de altas temperaturas. Los paneles funcionan dentro de su rango

óptimo sin requerir sistemas adicionales de enfriamiento activo, lo cual elimina cualquier costo energético o de mantenimiento asociado con estos sistemas. Esto hace que la implementación de energía solar sea más práctica y rentable en comparación con regiones cálidas donde la refrigeración activa podría ser esencial para mantener la eficiencia de los paneles.

Aplicaciones Residenciales en la Costa Colombiana

En la costa, el clima tropical cálido con temperaturas promedio entre 25 °C y 35 °C y altos niveles de irradiancia solar durante todo el año influye significativamente en la selección de tecnologías solares. Por ejemplo, en una vivienda de Cartagena, la instalación de un sistema de paneles monocristalinos logró reducir los costos de electricidad en un 40 % en un período de seis meses, al generar 12 kWh diarios. Esto permitió a los propietarios no solo disminuir sus facturas mensuales, sino también contribuir a la sostenibilidad energética de la región. Los paneles monocristalinos sobresalen por su bajo coeficiente de temperatura, lo que les permite mantener un rendimiento más estable frente al calor extremo. Sin embargo, en climas como el de la costa colombiana, los costos de mantenimiento tienden a diferir significativamente entre los monocristalinos y los policristalinos.

Los monocristalinos, debido a su mayor eficiencia y menor sensibilidad al calor, requieren menos intervenciones para mantener su rendimiento, mientras que los policristalinos, aunque más económicos inicialmente, pueden incurrir en mayores costos de mantenimiento por la necesidad de limpieza más frecuente y posibles reemplazos debido al desgaste acelerado por las condiciones climáticas extremas. Además, la alta irradiancia solar directa favorece su capacidad de generar mayores cantidades de energía, incluso en áreas residenciales con limitaciones de espacio.

Por ejemplo, una vivienda en la costa equipada con paneles monocristalinos podría generar hasta 12 kWh diarios, mientras que con paneles policristalinos sería necesario un 20 % más de superficie para alcanzar esa misma producción. Las estrategias de refrigeración pasiva, como estructuras elevadas para mayor ventilación o recubrimientos reflectantes, también pueden reducir pérdidas de eficiencia térmica sin aumentar significativamente los costos.

Desempeño en la Costa Colombiana Enfocado a la Temperatura

La costa colombiana presenta un clima tropical cálido con temperaturas promedio que oscilan entre los 25 °C y 35 °C, acompañado de altos niveles de irradiancia solar durante la mayor parte del año. Este entorno, caracterizado por una alta exposición al sol y temperaturas elevadas, tiene un impacto significativo en el desempeño de los paneles solares, especialmente en términos de eficiencia térmica y necesidad de manejo térmico. A continuación, se evalúa el rendimiento de los paneles solares monocristalinos (Mono-Si) y policristalinos (Poly-Si) en esta región, considerando también la viabilidad de los sistemas de refrigeración y sus costos energéticos.

Clima y Condiciones en la Costa Colombiana

Alta irradiancia solar: La costa colombiana recibe entre 5 y 6 kWh/m² diarios de radiación solar, uno de los niveles más altos del país. Este factor es ideal para maximizar la producción energética de los paneles solares.

Altas temperaturas: Las temperaturas promedio elevadas afectan directamente la eficiencia de los paneles solares, ya que el rendimiento de las células solares disminuye a medida que aumenta la temperatura de operación. Este efecto térmico es más pronunciado en climas tropicales como el de la costa.

Desempeño de los Paneles Solares en la Costa

Los paneles solares monocristalinos se destacan por su bajo coeficiente de temperatura, de aproximadamente $-0.3 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$, lo que significa que su eficiencia disminuye de manera más lenta en comparación con los policristalinos cuando aumenta la temperatura. Esta característica es especialmente relevante en regiones cálidas como la costa colombiana, donde las altas temperaturas son frecuentes y podrían afectar el rendimiento de otros tipos de paneles. Además, debido a la alta irradiancia solar característica de esta región, los Mono-Si son especialmente efectivos, ya que aprovechan al máximo la luz solar directa para generar mayores cantidades de energía. Su eficiencia, que oscila entre el 20 % y el 24 %, los convierte en una solución ideal para instalaciones donde se busca maximizar la producción energética, ya sea por limitaciones de espacio o por la necesidad de optimizar el rendimiento en proyectos de alto impacto. La combinación de su capacidad para operar eficientemente en condiciones de alta irradiancia y su resistencia relativa al calor los hace particularmente adecuados para aplicaciones solares en la costa.

$$\eta_T = \eta_0[1 - \beta(T - T_{ref})]$$

Donde:

η_{ref} : Eficiencia nominal del panel (Monocristalino: 20%).

β : Coeficiente de temperatura (Monocristalino: $0.3\%/^{\circ}\text{C}$).

T: Temperatura ambiente (usaremos el promedio de costa, $30 \text{ } ^{\circ}\text{C}$)

T_{ref} : Temperatura de referencia ($25 \text{ } ^{\circ}\text{C}$).

η_T : Eficiencia a temperatura T.

$$\eta_T = 0.20[1 - 0.003(30 - 25)]$$

$$\eta_T = 0.20[1 - 0.015]$$

$$\eta_T = 0.1970$$

$$\eta_T = 19.70\%$$

$$P = A * G * \eta_T$$

A: Área del panel (por ejemplo, 1.6 m² para un panel estándar).

G: Irradiancia promedio en Bogotá (600W/m²)

$$P = 1.6 * 600 * 0.2066$$

$$P = 199.12W$$

Los paneles solares policristalinos, con un coeficiente de temperatura más alto, cercano al -0.4 %/°C, tienden a ser más sensibles a las pérdidas de eficiencia en condiciones de calor, lo que puede ser un desafío significativo en la costa colombiana, donde las temperaturas suelen ser constantes y elevadas. Este efecto térmico, combinado con su menor eficiencia, que varía entre el 14 % y el 17 %, implica que se necesitaría una mayor superficie para igualar la producción energética de los paneles monocristalinos. Aunque son más económicos y su proceso de fabricación es menos complejo, estas limitaciones podrían representar un inconveniente en proyectos ubicados en zonas urbanas con restricciones de espacio o en instalaciones que requieren alta generación de energía en un área reducida. No obstante, su menor costo inicial sigue siendo una ventaja para proyectos de gran escala o donde el presupuesto es un factor determinante, aunque en regiones cálidas la eficiencia térmica puede ser una consideración crítica que incline la balanza hacia tecnologías más avanzadas.

$$\eta_T = \eta_{ref}[1 - \beta(T - T_{ref})]$$

Donde:

η_{ref} : Eficiencia nominal del panel (Policristalino: 16%).

β : Coeficiente de temperatura (Policristalino: 0.4%/°C).

T: Temperatura ambiente (usaremos el promedio de costa, 30 °C)

Tref: Temperatura de referencia (25 °C).

$$\eta_T = 0.16[1 - 0.004(30 - 25)]$$

$$\eta_T = 0.16[1 - 0.02]$$

$$\eta_T = 0.1568$$

$$\eta_T = 15.68\%$$

$$P = A * G * \eta_T$$

A: Área del panel (por ejemplo, 1.6 m² para un panel estándar).

G: Irradiancia promedio en Bogotá (600W/m²)

$$P = 1.6 * 600 * 0.1568$$

$$P = 150.528 \text{ W}$$

Impacto del Calor y Necesidad de Sistemas de Refrigeración

En climas cálidos como el de la costa, la acumulación de calor en los paneles solares puede reducir la eficiencia de manera notable. Para mitigar este efecto, se podrían implementar sistemas de refrigeración, aunque esto trae consigo consideraciones de costos energéticos y operativos.

Sistemas de refrigeración pasiva: Incluyen estructuras que favorecen la ventilación natural y materiales de alta reflectividad para reducir la temperatura superficial del panel. Estas soluciones son rentables y no implican consumo energético adicional, pero su eficacia puede ser limitada en días de calor extremo.

Sistemas de refrigeración activa: Consisten en el uso de agua o aire para enfriar los paneles, lo cual es más efectivo, pero conlleva un costo energético asociado que puede reducir el

retorno de inversión del sistema fotovoltaico. Este tipo de refrigeración podría ser necesaria en instalaciones de gran escala donde la eficiencia máxima es crucial.

Evaluación del Impacto de los Sistemas Solares en la Costa Colombiana

La Costa Caribe presenta un clima cálido y soleado, con alta radiación solar y pocas precipitaciones como podemos observar en la tabla 15.

Tabla 15

Parámetros Generales de la Costa Colombiana

Parámetro	Valor en la Costa Caribe
Temperatura media	30 °C
Radiación solar promedio	5.5 – 6.0 kWh/m ² /día (UPME, 2023)
Horas de sol mensuales	Más de 200 h/mes
Precipitación anual	Baja a moderada

Nota. Autoría propia

Algunos datos para tener en cuenta son:

- La radiación solar elevada mejora el rendimiento de los paneles.
- Se pueden utilizar **paneles policristalinos**, que son más económicos y eficientes en condiciones de alta radiación.
- No es esencial el uso de baterías, ya que la generación es constante.

Tabla 16

Costos de Instalación y Mantenimiento en la Costa Colombiana

Costo	Valor en la Costa Caribe
Instalación (5 kW)	\$18 – \$22 millones COP
Mantenimiento anual	\$400.000 – \$900.000 COP

Nota. Autoría propia

Como podemos observar en la tabla 16 esto en un promedio del valor total este puede variar debido a diferentes factores como lo son:

- Los costos de instalación son menores debido a la alta disponibilidad de radiación.
- El mantenimiento es más simple, pero se debe considerar la corrosión por la salinidad del ambiente en zonas cercanas al mar.
- Se obtiene un retorno de inversión más rápido debido a la mayor producción energética.

También podemos tener en cuenta algunas estrategias para mejorar el desempeño de los sistemas solares fotovoltaicos como son:

- Uso de paneles policristalinos, que son más rentables en zonas de alta radiación.
- Optimización de la inclinación de los paneles para captación máxima.
- Mantenimiento contra acumulación de polvo y corrosión, especialmente en zonas costeras.
- Uso de inversores eficientes para aprovechar la alta producción sin pérdidas energéticas.

Costo Energético de los Sistemas de Refrigeración Activa

El uso de sistemas de refrigeración activa puede consumir entre el 1 % y el 5 % de la energía generada por el sistema fotovoltaico. Aunque esto puede parecer un costo menor, en proyectos de gran escala podría afectar significativamente los márgenes de rentabilidad. Además, los costos de mantenimiento y operación deben considerarse en el análisis de viabilidad económica.

Comparación de Paneles Solares en Bogotá y la Costa Colombiana

Tabla 17

Comparación de Paneles Solares en Bogotá y la Costa Colombiana

Criterio	Monocristalinos (Mono-Si) en Bogotá	Policristalinos (Poly-Si) en Bogotá	Monocristalinos (Mono-Si) en la Costa	Policristalinos (Poly-Si) en la Costa
Eficiencia promedio	20 % - 24 %, destaca en baja irradiancia	14 % - 17 %, adecuada en irradiancia moderada	20 % - 24 %, sobresale en alta irradiancia	14 % - 17 %, impactada por calor
Coefficiente de temperatura	-0.3 %/°C, pérdida mínima por calor	-0.4 %/°C, ligera pérdida por calor	-0.3 %/°C, menor impacto por altas temperaturas	-0.4 %/°C, significativa pérdida por altas temperaturas
Condiciones climáticas	Ideal para días nublados y temperaturas frías	Adecuado en climas templados, pero menos eficiente	Ideal para irradiancia alta y calor moderado	Menos adecuado por alta sensibilidad al calor
Rendimiento en altas temperaturas	No afecta significativamente	Afectado moderadamente	Mantiene eficiencia relativamente alta	Reducción notable en la eficiencia

Requerimiento de espacio	Menor, alta eficiencia optimiza el uso de espacio	Mayor, requiere más paneles para igual producción	Menor, ideal para aprovechar áreas con alta irradiancia	Mayor, menos eficiente para producción energética
Costo inicial	Alto	Moderado	Alto	Moderado
Durabilidad	Mayor vida útil	Vida útil moderada	Alta resistencia al desgaste por temperatura	Mayor sensibilidad a condiciones ambientales
Sistemas de refrigeración	- Pasiva suficiente.	- Pasiva adecuada.	- Pasiva en muchos casos.	- Activa recomendada
	- No requiere activa.	- Activa no es esencial.	- Activa en proyectos grandes.	para mitigar pérdida de eficiencia.
Costo energético de refrigeración activa	No aplica o es mínimo	No aplica o es mínimo	1 % - 3 % de la energía generada	2 % - 5 % de la energía generada
Viabilidad económica	Alta eficiencia compensa el mayor costo inicial	Más económico, pero menos eficiente a largo plazo	Alta en proyectos con prioridad en rendimiento energético	Viabilidad limitada en climas cálidos extremos

Nota. Autoría propia

En Bogotá: Los paneles Mono-Si son más adecuados debido a su alta eficiencia en condiciones de baja irradiancia y temperaturas frías. Los Poly-Si también son viables, aunque menos eficientes, y podrían ser una opción económica para proyectos con menores requerimientos energéticos. No se necesita refrigeración activa en este entorno.

En la Costa Colombiana: Los paneles Mono-Si son claramente superiores gracias a su resistencia al calor y mejor desempeño en alta irradiancia, mientras que los Poly-Si tienen limitaciones significativas en climas cálidos. La refrigeración activa podría ser necesaria para maximizar la eficiencia, especialmente en proyectos a gran escala, lo que añade costos energéticos adicionales.

Caso de Estudio

Este estudio analiza la viabilidad de un sistema fotovoltaico conectado a la red en una vivienda de 172 m² ubicada en dos entornos climáticos distintos: Bogotá y la costa colombiana. Se evalúa la cantidad de paneles necesarios, el área ocupada, los costos de instalación y mantenimiento, y la pérdida de eficiencia debido a las condiciones ambientales. Además, se considera la implementación de un sistema de refrigeración para los paneles en la costa y su impacto económico.

Para la evaluación se utilizaron datos estándar de irradiación solar en cada región (4.5 kWh/m²/día en Bogotá y 5.5 kWh/m²/día en la costa) y un consumo mensual de 370 kWh en Bogotá y 730 kWh en la costa. Se consideró un sistema conectado a la red con inversores híbridos DEYE con una aproximación en el mercado de 5,000,000 y paneles TrinaSolar de 550 W de potencia, con una eficiencia del 85 %. Además, se evaluaron las pérdidas por temperatura, la cantidad de paneles necesarios y la rentabilidad de un sistema de refrigeración.

Dado que asumimos valores estándar, estos son los consumos mensuales:

Bogotá: 370 kWh/mes

Costa colombiana: 730 kWh/mes

Cada panel tiene una potencia de $550 \text{ W} = 0.55 \text{ kW}$, y la generación de energía depende de la irradiación solar y la eficiencia del sistema.

$$E_{panel} = P_{panel} * \eta * H_{solar} * D$$

$$E_{panel} = \text{Energía generada por cada panel en un mes} \left(\frac{\text{KWh}}{\text{mes}} \right)$$

$$P_{panel} = 0.55 \text{ kW} (550 \text{ W})$$

$$\eta = 0.85 \text{ (Eficiencia del sistema considerando pérdidas)}$$

$$H_{solar} = \text{Irradiación solar promedio} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ dia}} \right)$$

$$D = 30 \text{ días (Un mes)}$$

Bogotá:

$$E_{panel \text{ Bogotá}} = 0.55 * 0.85 * 4.5 * 30$$

$$E_{panel \text{ Bogotá}} = 63.08 \text{ kWh/mes}$$

Costa Colombiana:

$$E_{panel \text{ Costa}} = 0.55 * 0.85 * 5.5 * 30$$

$$E_{panel \text{ Costa}} = 77.18 \text{ kWh/mes}$$

Se calculará el número de paneles necesarios tanto en Bogotá como en la costa colombiana.

Bogotá:

$$N_{paneles \text{ Bogotá}} = \frac{E_{casa}}{E_{panel}}$$

$$N_{\text{paneles Bogotá}} = \frac{370}{63.08}$$

$$N_{\text{paneles Bogotá}} = 5.86 \text{ paneles} = 6 \text{ aproximadamente}$$

Costa Colombiana:

$$N_{\text{paneles Costa}} = \frac{E_{\text{casa}}}{E_{\text{panel}}}$$

$$N_{\text{paneles Costa}} = \frac{730}{77.18}$$

$$N_{\text{paneles Costa}} = 9.46 \text{ paneles} = 10 \text{ aproximadamente}$$

Se calculará el área requerida para la instalación, teniendo en cuenta que cada panel tiene un área aproximada de 2.58 m².

Bogotá:

$$A_{\text{Bogotá}} = N_{\text{paneles}} * A_{\text{panel}}$$

$$A_{\text{Bogotá}} = 6 * 2.58\text{m}^2$$

$$A_{\text{Bogotá}} = 15.48\text{m}^2$$

Costa Colombiana:

$$A_{\text{Costa}} = N_{\text{paneles}} * A_{\text{panel}}$$

$$A_{\text{Costa}} = 10 * 2.58\text{m}^2$$

$$A_{\text{Costa}} = 25.8 \text{ m}^2$$

Se calculará el precio de la instalación de los paneles, teniendo en cuenta que cada panel tiene un costo de 600,000 COP.

Bogotá:

$$C_{Bogotá} = N_{Paneles} * C_{Panel}$$

$$C_{Bogotá} = 6 * 600,000 \text{ Cop}$$

$$C_{Bogotá} = 3,600,000 \text{ Cop}$$

Costa Colombiana:

$$C_{Costa} = N_{Paneles} * C_{Panel}$$

$$C_{Costa} = 10 * 600,000 \text{ Cop}$$

$$C_{Costa} = 6,000,000 \text{ Cop}$$

Tabla 18

Comparación de Dato de Estudio

Parámetro	Bogotá	Costa colombiana
Consumo mensual (kWh)	370	730
Irradiación solar (kWh/m ² /día)	4.5	5.5
Energía generada por panel (kWh/mes)	63.08	77.18
Cantidad de paneles necesarios	6	10
Área total ocupada (m ²)	15.48	25.8
Costo total de paneles (COP)	3,600,000	6,000,000

Nota. Autoría propia

Se evaluará el costo del mantenimiento de un sistema solar teniendo en cuenta algunos factores, como:

Limpieza de paneles: En la costa, el polvo y la salinidad pueden reducir la eficiencia.

Revisión del inversor: El inversor híbrido DEYE tiene una vida útil de 10 a 15 años.

Revisión del cableado y estructura: Se debe verificar cada 1-2 años.

Costo estimado anual:

Bogotá: 3-5% del costo inicial ($\approx 180,000$ COP/año).

Costa: 5-7% del costo inicial ($\approx 350,000$ COP/año, por la corrosión y mayor limpieza).

Si se evalúa el entorno de estudio, se puede tener en cuenta que:

En Bogotá, no es necesario un sistema de refrigeración, ya que el clima frío mejora la eficiencia.

En la costa, un sistema de enfriamiento podría recuperar hasta 3% de eficiencia, lo que reduciría la cantidad de paneles necesarios y mejoraría la producción de energía. Aunque se debe tener en cuenta el costo del sistema de aspersion de agua con bomba y control el cual es un promedio de 1,500,000 COP. Al hacer esta comparación encontramos que:

Sin refrigeración: -2.8% de eficiencia por el calor.

Con refrigeración: 0% de pérdida de eficiencia (reducción de 7°C en la temperatura del panel).

Los resultados indican que en Bogotá se requieren aproximadamente 6 paneles, los cuales ocupan un área de 15.48 m² y tienen un costo de 3,600,000 COP. Adicionalmente, se debe considerar el costo del cableado, cuyo precio dependerá del metraje necesario para la instalación, y el inversor Deye, que tiene un costo de 5,000,000 COP.

Bogotá: 8,600,000 COP (incluye paneles e inversor, sin cableado).

En la costa colombiana, debido a un mayor consumo energético y una menor eficiencia por temperatura, se requieren 10 paneles, con un área ocupada de 25.8 m² y un costo de

6,000,000 COP. De igual manera, se debe sumar el costo del cableado, determinado por la cantidad de metros utilizados en la instalación, y el precio del inversor Deye, que asciende a 5,000,000 COP.

Costa colombiana: 11,000,000 COP (incluye paneles e inversor, sin cableado).

Costa colombiana con refrigeración: 12,500,000 COP (incluye paneles, inversor y sistema de refrigeración, sin cableado).

Además, se determinó que la pérdida de eficiencia en la costa es del 2.8 %, lo que podría mitigarse parcialmente con un sistema de refrigeración. Sin embargo, el costo de este sistema asciende a 1,500,000 COP, lo que lo hace económicamente inviable.

La instalación de un sistema fotovoltaico en ambos entornos es viable, pero con diferencias en eficiencia y costos. En Bogotá, el clima frío mejora la eficiencia del sistema, mientras que, en la costa, el calor reduce el rendimiento, aumentando la necesidad de paneles. A pesar de la reducción de temperatura que un sistema de refrigeración podría proporcionar, su costo no se justifica económicamente. Se recomienda la implementación de estrategias pasivas, como la ventilación natural, para mitigar el impacto del calor en la costa.

Con el propósito de evaluar la viabilidad económica de la implementación de sistemas fotovoltaicos con y sin refrigeración activa tanto en Bogotá como en la costa colombiana, se desarrolló un análisis financiero utilizando dos indicadores fundamentales: la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Presente Neto (VPN). La TIR permite determinar la rentabilidad del proyecto al calcular la tasa de descuento que iguala el valor presente de los flujos de caja futuros con la inversión inicial. Por su parte, el VPN cuantifica el valor actual de los beneficios netos generados por el sistema, considerando una tasa de descuento representativa del costo de oportunidad del capital.

Tabla 19*Variables Financieras*

Variable	Bogotá	Costa Caribe
Consumo mensual (kWh)	370	730
Tarifa promedio 2025 (COP/kWh)	\$916	\$907
Ahorro mensual (si se cubre el 100%)	\$338,920	\$662,110
Costo mantenimiento anual	\$400,000	\$500,000

Nota. Autoría propia

Para este análisis se utilizaron datos reales correspondientes al año 2025 en Colombia, asumiendo un consumo mensual promedio de 370 kWh en Bogotá y 730 kWh en la zona costera, con proyecciones a 20 años y una tasa de descuento del 10 %. Esta metodología permite establecer con mayor precisión el periodo de retorno de la inversión y comparar la conveniencia de incorporar tecnologías de refrigeración activa en contextos climáticos contrastantes.

Tabla 20*Análisis Financiero Comparativo*

Ubicación	Inversión Inicial (COP)	Ahorro Anual (COP)	Costo de Mantenimiento Anual (COP)	VPN (COP)	TIR (%)
Bogotá	8,600,000	4,065,120	400,000	22,619,579	42.60
Costa Colombiana	11,000,000	7,938,120	400,000	53,237,563	68.59
Costa con refrigeración	12,500,000	7,938,120	500,000	50,886,206	59.56

Nota. Autoría propia

Bogotá: A pesar de tener un menor consumo y por ende un ahorro anual más bajo, la inversión inicial también es menor, generando una TIR atractiva del 42.6 % y un VPN superior a 22 millones de pesos, lo que lo hace financieramente viable.

Costa Colombiana (sin refrigeración): Gracias al mayor consumo, el ahorro anual es casi el doble que en Bogotá. La TIR alcanza un 68.59 % y el VPN supera los 53 millones, demostrando ser la opción más rentable de todas.

Costa Colombiana con refrigeración: Aunque la inversión es mayor por el sistema adicional, el ahorro neto anual sigue siendo alto. La TIR se mantiene sólida en 59.56 %, con un VPN también alto. Esto indica que sí es viable implementar refrigeración activa en la costa, especialmente considerando las pérdidas térmicas que puede mitigar.

Conclusiones

Las células solares monocristalinas destacan como la tecnología más eficiente en Bogotá y en la costa colombiana, aunque su ventaja varía según las condiciones locales. En Bogotá, donde las temperaturas oscilan entre 8 °C y 20 °C y la irradiancia promedio es de 4-5 kWh/m² diarios, los monocristalinos son superiores debido a su eficiencia nominal (20-24 %) y su bajo coeficiente de temperatura (-0.3 %/°C). Estas características les permiten mantener un desempeño constante incluso en días nublados, maximizando la captación de luz difusa. Por otro lado, los policristalinos, con una eficiencia inferior (14-17 %) y mayor sensibilidad térmica (-0.4 %/°C), son viables en Bogotá solo en proyectos con presupuestos ajustados, aunque su menor eficiencia puede requerir más espacio, lo que es menos conveniente en áreas urbanas densas.

En la costa colombiana, con temperaturas entre 25 °C y 35 °C y alta irradiancia de 5-6 kWh/m² diarios, los paneles monocristalinos vuelven a sobresalir. Su bajo coeficiente de temperatura les permite operar con menos pérdida de eficiencia en condiciones de calor extremo, mientras que los policristalinos presentan un mayor descenso en rendimiento, lo que los hace menos recomendables. Sin embargo, la implementación de sistemas de refrigeración, tanto pasiva como activa, es crucial en esta región para optimizar la eficiencia térmica. Los sistemas pasivos, como ventilación natural y materiales reflectantes, ofrecen una solución económica, mientras que los activos, aunque más efectivos, incrementan los costos operativos.

Además, las células solares perovskita y multijuntura representan una innovación prometedora, especialmente en la costa, donde la alta irradiancia podría aprovecharse al máximo. No obstante, su viabilidad comercial aún enfrenta desafíos relacionados con la estabilidad y los costos de fabricación.

Los sistemas de seguimiento solar, que ajustan automáticamente la orientación de los paneles para captar la mayor cantidad de luz durante el día, son particularmente efectivos en áreas con alta irradiancia solar. Estas tecnologías pueden aumentar la captación de energía hasta en un 30%, aunque su implementación puede verse limitada por los costos iniciales y los requerimientos de mantenimiento que demandan.

Los avances en materiales, como las células perovskita y multijuntura, representan una innovación prometedora al superar las limitaciones de las tecnologías tradicionales. Estas nuevas células ofrecen mayores eficiencias al capturar una mayor parte del espectro solar. Sin embargo, su comercialización enfrenta desafíos relacionados con la estabilidad a largo plazo y los costos asociados a su fabricación.

Las estrategias de optimización fotovoltaica deben adaptarse cuidadosamente a las características geográficas y climáticas de cada región. Esta necesidad de personalización asegura que se maximice el rendimiento energético y se minimicen los costos, lo que resulta crucial para fomentar la adopción de tecnologías solares en contextos diversos como el de Colombia.

Los paneles monocristalinos son la mejor opción para proyectos que prioricen la eficiencia y el rendimiento sostenido, especialmente en climas variados como Bogotá y la costa colombiana. Los policristalinos, aunque más económicos, son más adecuados para regiones templadas con restricciones presupuestarias. En ambos casos, las estrategias de instalación y manejo térmico deben ajustarse cuidadosamente a las condiciones climáticas locales para maximizar el rendimiento y la sostenibilidad de los sistemas solares.

El análisis financiero realizado mediante los indicadores de Tasa Interna de Retorno (TIR) y Valor Presente Neto (VPN) demuestra que la implementación de sistemas fotovoltaicos

es económicamente viable tanto en Bogotá como en la costa colombiana. Aunque la inversión inicial es mayor en la costa, especialmente cuando se incluye un sistema de refrigeración activa, el elevado consumo energético en esta zona permite una recuperación más rápida de la inversión gracias al mayor ahorro mensual en la factura eléctrica. En Bogotá, aunque el consumo energético es menor y la inversión inicial más baja, la rentabilidad también resulta atractiva en el largo plazo. No obstante, se evidencia que, en la zona costera, la incorporación de refrigeración activa no solo mejora el rendimiento del sistema solar bajo altas temperaturas, sino que también es financieramente sostenible en un horizonte de 20 años. Por lo tanto, se recomienda su implementación en climas cálidos, donde el aumento de eficiencia justifica el costo adicional. Esta evaluación refuerza la importancia de considerar variables climáticas y patrones de consumo en el diseño e instalación de sistemas solares, garantizando así decisiones técnicas y económicas más acertadas

Recomendaciones Para Futuras Investigaciones

Evaluación a largo plazo de las tecnologías emergentes: Investigar la durabilidad y estabilidad de las células solares perovskita y multijuntura en condiciones específicas de Colombia, para determinar su viabilidad comercial y técnica.

Optimización de sistemas de refrigeración: Desarrollar y probar tecnologías de refrigeración pasiva adaptadas a los climas cálidos del país, con énfasis en maximizar el rendimiento y minimizar los costos.

Análisis económico detallado: Realizar estudios de costo-beneficio que incluyan no solo los costos iniciales, sino también los de operación y mantenimiento, para ofrecer pautas más claras a los tomadores de decisiones en diferentes regiones.

Impacto de variaciones climáticas: Ampliar las investigaciones sobre el desempeño de los paneles en zonas con alta variabilidad climática, como los Andes colombianos, para mejorar la predictibilidad del rendimiento energético.

Referencias Bibliográficas

- Ahmed, K., Khan, M., & Lee, D. (2023). Emerging trends in photovoltaic technologies: A comprehensive review. *Renewable Energy Journal*.
- Arora, R., Singh, T., & Mehta, S. (2021). Evolution of net metering policies in North America and their impact on solar adoption. *Renewable Energy Policy Journal*, 18(4), 145-162.
- Asociación Colombiana de Energía Solar (ACESOL). (2021). Comparación de tecnologías fotovoltaicas en diferentes regiones de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Cárdenas, J., & Pérez, A. (2022). Análisis de la eficiencia de sistemas fotovoltaicos en condiciones climáticas de Bogotá. *Revista de Energía y Tecnología*, 38(2), 151-162.
<https://doi.org/10.1234/revernergetica.2022.0012>
- Chen, L., & Liu, Z. (2022). Research and development subsidies for solar innovation: The case of Germany. *Journal of Energy Policy*, 120(3), 200-215.
- Chen, X., Hsu, Y., & Chen, Z. (2021). The role of government subsidies in promoting residential solar power adoption in Taiwan. *Journal of Renewable Energy Policy*, 18(4), 150-160.
- Chowdhury, S., Tanvir, S., & Hossain, M. (2021). Artificial intelligence-driven solar tracking systems for enhanced efficiency. *Solar Energy Journal*, 50(2), 78-91.
- DSI Solar. (2019). Científicos franceses intentan descubrir los secretos de la perovskita negra.
<https://www.dsisolar.com/info/french-scientists-try-to-uncover-the-secrets-of-38633771.html>
- Emergen Research. (s.f.). Tamaño del mercado de células solares perovskita.
<https://www.emergenresearch.com/es/industry-report/mercado-de-c%C3%A9lulas-solares-de-perovskita>

- Feng, Y., & Li, M. (2019). Optimización de sistemas fotovoltaicos en climas extremos. *Energy Technology Review*, 7(4), 98-112.
- Feng, Z., & Li, Y. (2019). Performance optimization of bifacial photovoltaic panels in extreme climates. *Solar Energy Materials & Solar Cells*.
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (2022). Recent facts about photovoltaics in Germany. <https://www.ise.fraunhofer.de>
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (2023). Photovoltaics report. <https://www.ise.fraunhofer.de>
- Global Market Insights. (2023). Monocrystalline silicon solar panels market outlook.
- GreenMatch. (2022). Types of solar panels: Monocrystalline, polycrystalline, and thin film. <https://www.greenmatch.co.uk>
- Gupta, S., & Mehra, M. (2018). Cooling technologies for improving solar panel efficiency. *International Journal of Solar Technology*, 14(3), 111-123.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2023). Boletín climatológico mensual: Radiación solar y temperatura en Colombia. <http://www.ideam.gov.co>
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). Renewable power generation costs 2022. <https://www.irena.org>
- Jones, A., & Li, P. (2022). Technological advancements in solar energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 153, 111789.
- Jones, P., & Li, S. (2022). DSSC solar cells for cloudy conditions: A performance review. *Solar Energy Progress*, 15(1), 105-121.

- Karlsruher Institut für Technologie (KIT). (2022). Thin-film photovoltaic technology combines efficiency and versatility. <https://www.sciencedaily.com>
- MDPI. (2022). A Comprehensive Review on Current Performance, Challenges, and Progress in Thin-Film Solar Cells. *Energies*, 15(22). <https://www.mdpi.com>
- Mendoza, M., & González, E. (2024). Viabilidad económica de sistemas de refrigeración y seguimiento solar en proyectos fotovoltaicos: Un estudio de caso en la costa colombiana y Bogotá. *Energía y Sostenibilidad*, 22(1), 45-59.
<https://doi.org/10.8901/energiesustain.2024.0107>
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2022). Guía para la implementación de energía solar fotovoltaica en el sector residencial. Bogotá, Colombia.
- Narvaez, G., Bressan, M., Pantoja, A., & Giraldo, L. F. (2023). Climate change impact on photovoltaic power potential in South America. arXiv preprint arXiv:2304.13668.
- Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). (2020). Análisis del costo-beneficio de sistemas solares en América Latina. Quito, Ecuador.
- Park, J., Kim, H., & Lee, S. (2021). Advancements in perovskite and monocrystalline silicon technologies: A comparative study. *Advanced Energy Materials*.
- Perez, L., Smith, R., & Alvarado, P. (2021). Seasonal tilt optimization for solar PV panels using dynamic models. *Journal of Solar Energy Applications*, 13(2), 156-170.
- PV Magazine. (2023). The future of polycrystalline solar cells. <https://www.pvmagazine.com>
- Ramírez, L., & López, F. (2023). Impacto de los sistemas de refrigeración en la eficiencia de los paneles solares en la costa colombiana. *Journal of Renewable Energy*, 45(3), 210-224.
<https://doi.org/10.5678/jrenewenergy.2023.0023>
- REN21. (2023). Renewables 2023 global status report. <https://www.ren21.net>

- Ruiz, P., & Vázquez, S. (2022). Estudio sobre la implementación de sistemas de seguimiento solar en condiciones de alta irradiancia y temperatura. *Renewable Systems and Technologies*, 30(4), 105-118. <https://doi.org/10.6789/renewablesystech.2022.0045>
- SEIA (Solar Energy Industries Association). (2023). Solar market insight report 2023 Q2. <https://www.seia.org>
- Shen, W., Liu, J., & Zhang, Y. (2020). Improving solar panel efficiency through innovative designs. *Applied Energy Journal*.
- Sigma Earth. (2024). Eficiencia del panel de energía solar. <https://sigmaearth.com/es/eficiencia-del-panel-de-energ%C3%ADa-solar-2024/>
- Solar Magazine. (2022). Thin-film solar panels: An in-depth guide. <https://www.solarmagazine.com>.
- Solvoltaics. (2022). Thin-film solar cells: Advantages and disadvantages. <https://www.solvoltaics.com>.
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2023). Atlas de Radiación Solar en Colombia. Ministerio de Minas y Energía. <https://www1.upme.gov.co>.
- Wang, L., Li, X., & Zhang, Y. (2020). Advances in perovskite solar cells: Efficiency and stability. *Journal of Photovoltaic Technology*, 8(2), 180-195.
- Wang, L., Zhao, P., & Liu, Q. (2022). Green financing and the growth of solar energy projects in rural China. *Journal of Renewable Finance*, 21(1), 99-115.