

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Efecto de la temperatura en paneles solares fotovoltaicos y tecnologías de refrigeración para el mejoramiento de la eficiencia – Una revisión

Fabián David Linares Rojo

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Especialista en Gestión de Sistemas Energéticos Industriales

Asesor(es)

Luz Adriana Trejos Grisales
Bernardo Argemiro Herrera Múnera

Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM
Facultad de Ingenierías
Medellín, Colombia
2022

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

RESUMEN

La eficiencia de una celda solar se ve afectada por varios factores, entre los más relevantes está la temperatura de operación, dado que cuando se incrementa hace que la eficiencia disminuya. Mediante una revisión bibliográfica de artículos, tesis de grado, páginas web y libros, se indaga e interpreta información sobre el efecto de la temperatura en la eficiencia de las celdas solares, tecnologías de refrigeración y resultados obtenidos aplicando la refrigeración.

Inicialmente se pudo establecer que el parámetro más afectado es el voltaje de circuito abierto, dado que se reduce significativamente con el aumento de la temperatura, impactando directamente la potencia generada por la celda solar o módulo fotovoltaico y su eficiencia. Esta variación está dada por el coeficiente de temperatura, el cual varía dependiendo el tipo de celda solar. El valor de este parámetro está dado en el rango de -0,25% y -0,5%, reduciendo la eficiencia en igual magnitud por cada grado Celsius que aumenta la temperatura. Adicional a esto se logró establecer el modelo matemático más utilizado para determinar la eficiencia de la celda solar con base en la temperatura de operación.

Con el fin de estudiar métodos de contrarrestar el impacto de la temperatura en una celda solar, se realiza una investigación de seis tecnologías de refrigeración utilizadas en paneles solares fotovoltaicos, los cuales son: agua, aire, combinada agua y aire, nanofluidos, materiales de cambio de fase (PCM por sus siglas en inglés) y tubos de calor. Se efectúa una descripción general de cada uno de los sistemas, se muestra un esquema de cómo es la configuración en los paneles solares y se describen algunos puntos a favor y en contra de las tecnologías avanzadas de nanofluidos, tubos de calor y PCM. En último lugar se realiza una revisión de la literatura donde se plasman los resultados obtenidos cuando se utiliza cada una de las tecnologías de refrigeración, se realiza un promedio y se obtiene que la tecnología Agua-aire aumenta la eficiencia un 21,85%, nanofluidos 21,1%, agua 17,72%, aire 16,45%, tubos de calor 14,63% y PCM 8,92%.

Palabras clave: Celda solar, temperatura, eficiencia, refrigeración

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

RECONOCIMIENTOS

Inicialmente agradezco a Dios por darme salud y vida y poder tener la oportunidad de realizar la especialización, a mi esposa e hijo por su tiempo y su apoyo incondicional, solo ellos y yo sabemos cómo fue este camino y a los dos asesores que me acompañaron en la etapa de ejecución de la monografía, dado que sus consejos, exigencia y retroalimentación, siempre aportaron al desarrollo del trabajo y culminarlo de la mejor manera.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

ACRÓNIMOS

eV Electronvoltio

PV Fotovoltaico

ITO Óxido de indio y estaño

TCO Óxido conductor transparente, por sus siglas en inglés

PCM Materiales de cambio de fase, por sus siglas en inglés

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1 Objetivos.....	7
1.1.1 Objetivo general.....	7
1.1.2 Objetivos específicos.....	7
2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 El sol.....	8
2.2 Radiación solar.....	9
2.2.1 Componentes de la radiación solar.....	10
2.3 Efecto fotoeléctrico.....	11
2.4 Mecanismos de transferencia de calor.....	12
2.4.1 Transferencia de calor por conducción.....	13
2.4.2 Transferencia de calor por convección.....	13
2.4.3 Transferencia de calor por radiación.....	14
2.5 Contexto global de la energía solar fotovoltaica.....	14
2.6 Energía solar fotovoltaica en Colombia.....	15
3. METODOLOGÍA.....	18
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
4.1 Efecto de la temperatura en la eficiencia de paneles solares fotovoltaicos.....	19
4.1.1 Generalidades.....	19
4.1.2 Eficiencia de una celda PV.....	25
4.1.3 Impacto de la temperatura en paneles solares fotovoltaicos.....	33
4.1.4 Modelos teóricos sobre la eficiencia de una celda solar.....	37
4.2 Tecnologías de refrigeración aplicadas en paneles solares fotovoltaicos.....	40
4.2.1 Refrigeración con aire.....	40
4.2.2 Refrigeración con agua.....	41
4.2.3 Materiales de cambio de fase.....	42
4.2.4 Nanofluidos.....	47
4.2.5 Refrigeración por tubos de calor.....	49
4.2.6 Refrigeración agua-aire.....	54
4.3 Impacto de la refrigeración en la eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos.....	56
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....	70
REFERENCIAS.....	71
ANEXOS.....	77

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

1. INTRODUCCIÓN

A través de los años la demanda de energía eléctrica en el mundo ha ido aumentando considerablemente, dado que es un recurso necesario para el desarrollo de cualquier país. Para el año 2019 el 63% de la energía eléctrica generada a nivel mundial proviene de combustibles fósiles (Statista, 2022) y la demanda de energía mundial comprende el 80% que depende de estos combustibles (ONU, 2022). Este tipo de combustibles generan el 80% de las emisiones de CO₂ a la atmósfera y a mayor concentración de CO₂ en la atmósfera, aumenta la temperatura promedio del planeta (Acosta, 2011). En la actualidad estos combustibles son abundantes, pero no lo suficiente para sostener y abastecer la demanda energética global, por estas razones se ha visto la necesidad de generar una conciencia de ahorro energético y buscar alternativas de eficiencia energética para aprovechar la energía de una mejor manera a nivel mundial.

Dado lo anterior se ha volcado la atención, al estudio, desarrollo e implementación de la generación de energía eléctrica por medio de las fuentes renovables, por ejemplo, hidráulica, eólica, solar, biomasa y geotérmica, las cuales ayudan a reducir los gases de efecto invernadero (GEI). La generación de energía solar fotovoltaica es una de las más importantes, dado que su principal fuente de funcionamiento es el sol, el cual es inagotable. La tecnología que sobresale en la utilización de la energía del sol es los paneles fotovoltaicos, no afectan el medio ambiente en su etapa de operación, sin embargo, no son muy eficientes, dado que del total de radiación que reciben solo el 20% (N. K. Sharma et al., 2020) se convierte en energía eléctrica y dependiendo del material de construcción del panel fotovoltaico la eficiencia generalmente está entre el 7% y el 20% (Nebballi et al., 2016).

Por otro lado, en Colombia la cobertura del sistema interconectado nacional (SIN) está entre el 96,5% y 97% (Energía, 2021), (Vanguardia, 2021), (República, 2022). La energía solar fotovoltaica es una opción por considerar para mejorar la calidad de vida de las personas que no cuentan con el suministro de energía eléctrica (aproximadamente el 3% de la población), dado a que están ubicados en zonas no interconectadas.

Para que este tipo de sistemas energéticos sean competitivos, se deben tomar medidas para mejorar su eficiencia. Uno de los factores más influyentes en el rendimiento de los paneles fotovoltaicos es la temperatura, dado que cuando aumenta la temperatura de la superficie de operación, genera principalmente dos efectos perjudiciales: primero, disminuye la tensión de circuito abierto lo que causa una disminución en la potencia generada y la eficiencia del sistema, y segundo se reduce la vida útil del equipo. Por lo anterior es importante conocer las principales tecnologías de refrigeración utilizadas en paneles solares fotovoltaicos y estudiar cómo ayudan a mejorar la eficiencia de estos sistemas. Para el desarrollo de este trabajo se establecieron los siguientes objetivos:

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Establecer el efecto de la temperatura en el funcionamiento de los paneles solares fotovoltaicos, reconociendo las tecnologías de refrigeración para mejorar su eficiencia.

1.1.2 Objetivos específicos

- Identificar el efecto de la temperatura en la eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos.
- Distinguir las diferentes tecnologías de refrigeración para paneles solares fotovoltaicos.
- Analizar el efecto de la aplicación de refrigeración en la eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos.

El desarrollo de estos objetivos se planteó en tres capítulos. En la primera parte se presentan los diferentes tipos de celdas solares, rangos de eficiencia, modelos circuitales de una celda solar y los parámetros más afectados con el aumento de la temperatura que impactan la eficiencia de estos dispositivos. En el segundo capítulo se realizó una descripción general de las tecnologías de refrigeración más comunes donde se utiliza como medio refrigerante aire, agua, combinación de agua y aire, materiales de cambio de fase (PCM por sus siglas en inglés), nanofluidos y tubos de calor. Para finalizar en el capítulo tres se presenta un resumen de la revisión bibliográfica realizada donde se muestra los resultados obtenidos en cuanto al aumento de la eficiencia utilizando las diferentes tecnologías de refrigeración y se realizan algunas conclusiones.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

2. MARCO TEÓRICO

La energía eléctrica es una parte fundamental en el desarrollo tecnológico y económico de un país, el aumento del uso de energía ha creado problemas de demanda y oferta. Si se pretende satisfacer la creciente demanda mundial de energía con combustibles fósiles, es posible que en pocos años ya no estén disponibles para la producción de energía, por lo cual, el mundo debe enfocarse en fuentes de energía renovable para satisfacer la demanda y conservar los recursos naturales finitos (Cuchicóndor, 2019).

Las energías renovables ejercen un papel muy importante, debido a que satisfacen la demanda de energía eléctrica cuidando el medio ambiente. Las fuentes de energía que se consideran renovables son aquellas que se utilizan y se renuevan, por ejemplo: la fuerza del viento, la luz del sol, el agua de los ríos, etc. y son infinitas dentro de un marco de tiempo relevante para los seres vivos (Cata & Rodríguez, 2015).

La energía solar, es la energía radiante del sol, la cual es abundante, relativamente confiable y no se limita a una determinada región geográfica, siendo una fuente de energía renovable ilimitada. En este capítulo se realizará definición de algunos conceptos que ayudan a comprender el funcionamiento de una celdas solar y se mostrará información estadística sobre la energía solar fotovoltaica en Colombia y a nivel mundial.

2.1 El sol

El sol se encuentra a una distancia promedio de 150 millones de kilómetros de la tierra. Es la principal fuente de luz y calor. De acuerdo con un análisis de su composición en función de su masa, contiene un 71% de hidrógeno, un 27% helio, y un 2% de otros elementos como hierro, níquel, oxígeno, silicio, azufre, magnesio, carbono, neón, calcio y cromo. El sol contiene más del 99% de toda la materia del sistema solar y se formó hace 4500 millones de años. Ejerce una fuerte atracción gravitatoria sobre los planetas y los hace girar a su alrededor (IDEAM, 2022).

En el núcleo del sol se llevan a cabo reacciones nucleares que originan núcleos de helio o una partícula alfa a partir de cuatro protones o hidrogeno, debido a esto el sol podría considerarse como un gran reactor nuclear, por sus reacciones nucleares en cadena. Estas reacciones son conocidas como cadena protón - protón, donde la conversión de hidrógeno a helio libera una fracción de masa que se convierte en energía, generando alrededor de 90.000 millones de megatones de energía la cual es emitida al espacio en forma de radiación electromagnética (Casavilca & Dueñas, 2019).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

2.2 Radiación solar

Es la energía emitida por el sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. Esa energía es el motor que determina la dinámica de los procesos atmosféricos y el clima. La energía procedente del sol es radiación electromagnética proporcionada por las reacciones del hidrógeno en el núcleo del sol por fusión nuclear y emitida por la superficie solar (IDEAM, 2022).

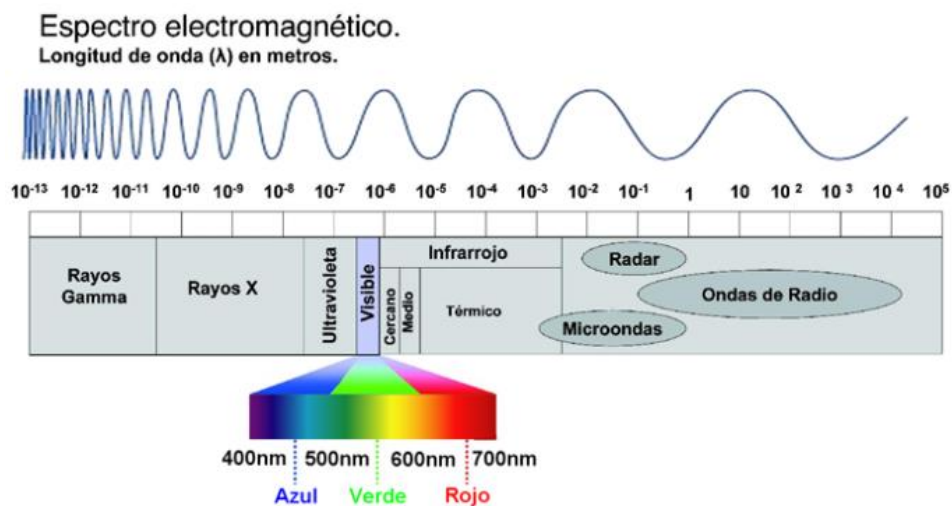
La radiación electromagnética se puede ordenar en un espectro en diferentes longitudes de onda, como se muestra en la Figura 1, que se extiende desde longitudes de onda corta de billonésimas de metro (frecuencias muy altas), como los rayos gama, hasta longitudes de onda larga de muchos kilómetros (frecuencias muy bajas) como las ondas de radio. El espectro electromagnético no tiene definidos límites superior ni inferior y la energía de una fracción diminuta de radiación, llamada fotón, es inversamente proporcional a su longitud de onda, entonces a menor longitud de onda mayor contenido energético (IDEAM, 2022).

El sol emite energía en forma de radiación de onda corta, principalmente en la banda del ultravioleta, visible y cercano al infrarrojo, con longitudes de onda entre 0,2 y 3,0 micrómetros

La región del ultravioleta está entre los 100 y los 400 nanómetros, la del infrarrojo cercano está entre los 700 y los 4000 nanómetros y la visible está entre los 400 y los 700 nanómetros. A cada región le corresponde una fracción de la energía total incidente en la parte superior de la atmósfera distribuida así: 7,2% al ultravioleta; 47,2% al visible y 45,6% al infrarrojo (IDEAM, 2022).

Figura 1

Espectro electromagnético de la radiación solar



Nota. Tomado de *Radiación Solar*. Sitio WEB. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar-ultravioleta>

2.2.1 Componentes de la radiación solar

Según (Casavilca & Dueñas, 2019) la radiación tiene tres componentes, las cuales se describen a continuación:

Directa: es conocida también como radiación rayo, ya que llega a la tierra en línea recta sin desviaciones, reflexiones ni refracciones en su recorrido, es la más importante para las aplicaciones fotovoltaicas, ya que puede concentrarse para su utilización.

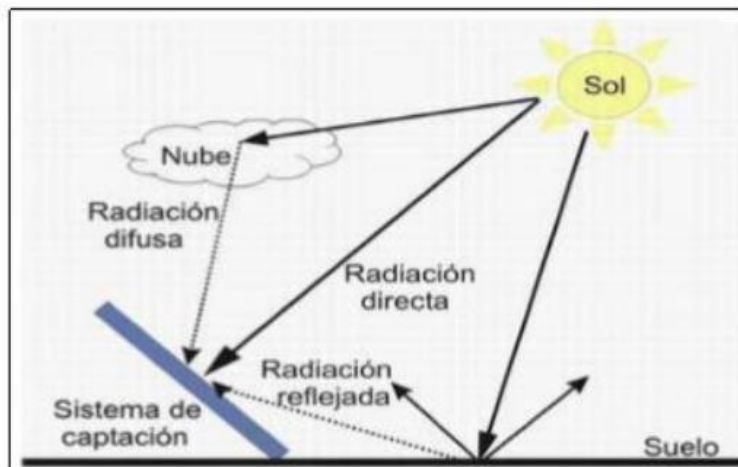
Difusa: es la radiación que se recibe después de su dirección haya sido alterada por dispersión en la atmosfera, superficies o absorbida por nubes. Debido a las reflexiones que sufre, esta radiación pierde energía.

Albedo: es la radiación directa y difusa que se recibe por reflexión en el suelo u otras superficies próximas.

El total de radiación es la suma de estos tres componentes, en la Figura 2 se muestra de manera gráfica el comportamiento de la radiación, teniendo en cuenta estas tres componentes.

Figura 2

Componentes de la radiación solar



Nota. Tomado de Modelamiento matemático y validación experimental para incrementar la eficiencia de un panel fotovoltaico en un sistema híbrido. *Universidad Nacional Del Centro Del Peru De Posgrado*, 87. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/5992>

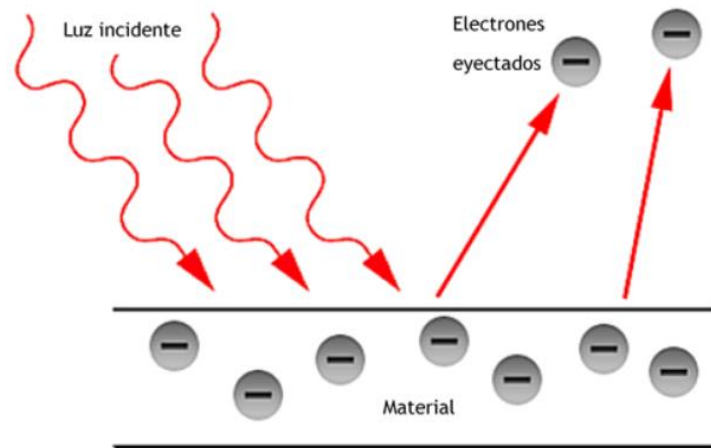
	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

2.3 Efecto fotoeléctrico

Es un fenómeno físico que transforma la energía luminosa en energía eléctrica. La luz está compuesta de partículas llamadas fotones, y un rayo de luz que viaja en forma de onda es una corriente de fotones. Cuando la luz incide sobre un material, se desprenden electrones de este, debido al choque de los fotones. Los electrones que se desprenden pueden ser utilizados para establecer una corriente eléctrica (González et al., n.d.). En la Figura 3 se muestra el fenómeno descrito en el párrafo anterior.

Figura 3

Efecto Fotoeléctrico



Nota. Tomado de http://seslab.org/fotovoltaico/11_el_efecto_fotoelctrico.html

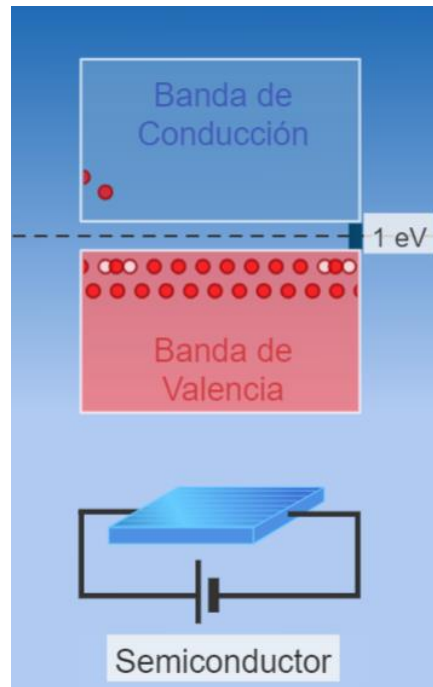
Un material semiconductor tiene dos bandas de energía, una es la banda de valencia que es la banda ocupada por los electrones y la banda de conducción que es la banda de energía ubicada justo encima de la banda de valencia. Está completamente vacía o parcialmente llena. Es en la banda de conducción donde se encuentran los electrones menos ligados al núcleo y, por tanto, es probable que se conviertan en electrones libres (Edumedia, 2022).

En un material semiconductor la conductividad aumenta con la temperatura. La banda de menor energía (banda de valencia) está completa y separada de la siguiente banda de energía vacía (banda de conducción) por una banda prohibida. La existencia de un rango prohibido de energía entre las bandas de valencia y de conducción es esencial para la explicación de las características eléctricas de los semiconductores. Este intervalo de energía prohibida corresponde a la energía que debe recibir un electrón de la banda de valencia para pasar a la banda de conducción. La anchura de la banda prohibida en los semiconductores es pequeña (alrededor de 1 eV), por lo que resulta fácil excitar térmicamente los electrones de la banda de valencia a la banda de conducción (Málaga,

2022). En la Figura 4 se muestra un esquema de las bandas de valencia, conducción y banda prohibida.

Figura 4

Banda prohibida en un semiconductor



Nota. Tomado de *Teoría de Bandas de Semiconductores*. Publicación WEB.

<https://www.edumedia-sciences.com/es/media/949-teoria-de-bandas-de-semiconductores>

El material semiconductor recibe los fotones por el lado n donde están los electrones, haciendo que algunos de estos puedan atravesar la barrera de potencial fuera del material semiconductor hacia un circuito externo generando una corriente eléctrica. Los electrones al recorrer el circuito externo vuelven a ingresar al material semiconductor por el lado p (González et al., n.d.).

2.4 Mecanismos de transferencia de calor

El intercambio de calor con el medio ambiente ocurre con tres modos de transferencia de calor, que son la transferencia de calor por conducción, convección y radiación.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

2.4.1 Transferencia de calor por conducción

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de sus interacciones. La conducción puede ocurrir en sólidos, líquidos o gases; en estos últimos dos la conducción se debe a las colisiones de las moléculas durante su movimiento aleatorio, mientras que en los sólidos se debe a la combinación de la vibración de las moléculas en una red y el transporte de energía mediante electrones libres (Cengel, 2009).

El grosor de las celdas solares laminadas suele ser muy pequeño, alrededor de 3 mm. Por lo tanto, se supone que no existe un gradiente de temperatura significativo dentro del módulo fotovoltaico; y se desprecia la conducción (Tuncel et al., 2020).

2.4.2 Transferencia de calor por convección

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento, y tiene que ver con los efectos combinados de conducción y movimiento del fluido: mientras más rápido sea este mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento en masa del fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura. El movimiento de la masa del fluido incrementa la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido, pero también complica la determinación de las tasas de transferencia de calor. La tasa de transferencia de calor por convección (\dot{Q}) se puede expresar por la ley de enfriamiento de Newton, la cual se muestra en la Ecuación 1 (Cengel, 2009).

$$\dot{Q} = hA(T_s - T_f) \quad (1)$$

Donde,

h coeficiente de transferencia de calor

A área de la superficie

T_s temperatura de la superficie

T_f temperatura del fluido lejos de la superficie

El módulo fotovoltaico se puede modelar como una placa inclinada sumergida en un fluido. La estimación del coeficiente de transferencia de calor por convección depende en gran medida de las características del flujo del fluido alrededor de la superficie; y a su vez, depende de la posición de la superficie respecto a la dirección del fluido convectivo. En convección natural, se puede identificar dos comportamientos del fluido, los cuales son flujo laminar y flujo turbulento. En convección forzada, la dirección del viento es el factor decisivo en el cálculo de la tasa de calor transferido desde el módulo fotovoltaico. Se observan tres patrones de flujo distintos para una placa inclinada. Cuando el viento sopla de costado hacia el módulo, se desarrolla una región de flujo paralelo. Las regiones

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

frontal y posterior se forman cuando el viento sopla hacia la superficie delantera o trasera del módulo (Tuncel et al., 2020).

2.4.3 Transferencia de calor por radiación

La radiación es la energía que emite la materia en la forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de energía por radiación no requiere la presencia de un medio. De hecho, este tipo de transferencia es la más rápida (se lleva a cabo a la velocidad de la luz) y no experimenta ninguna atenuación en el vacío. Este es exactamente el modo como la energía del sol llega a la tierra (Cengel, 2009).

En los módulos fotovoltaicos montados en una terraza, el intercambio de radiación se produce con el cielo, la tierra y el techo. La acción crítica en el cálculo de la pérdida de calor por radiación es la estimación correcta de la temperatura de estas superficies. Las temperaturas de la tierra y del techo dependen del estado del terreno que rodea el módulo fotovoltaico y los materiales utilizados en la cubierta del techo. (Tuncel et al., 2020).

2.5 Contexto global de la energía solar fotovoltaica

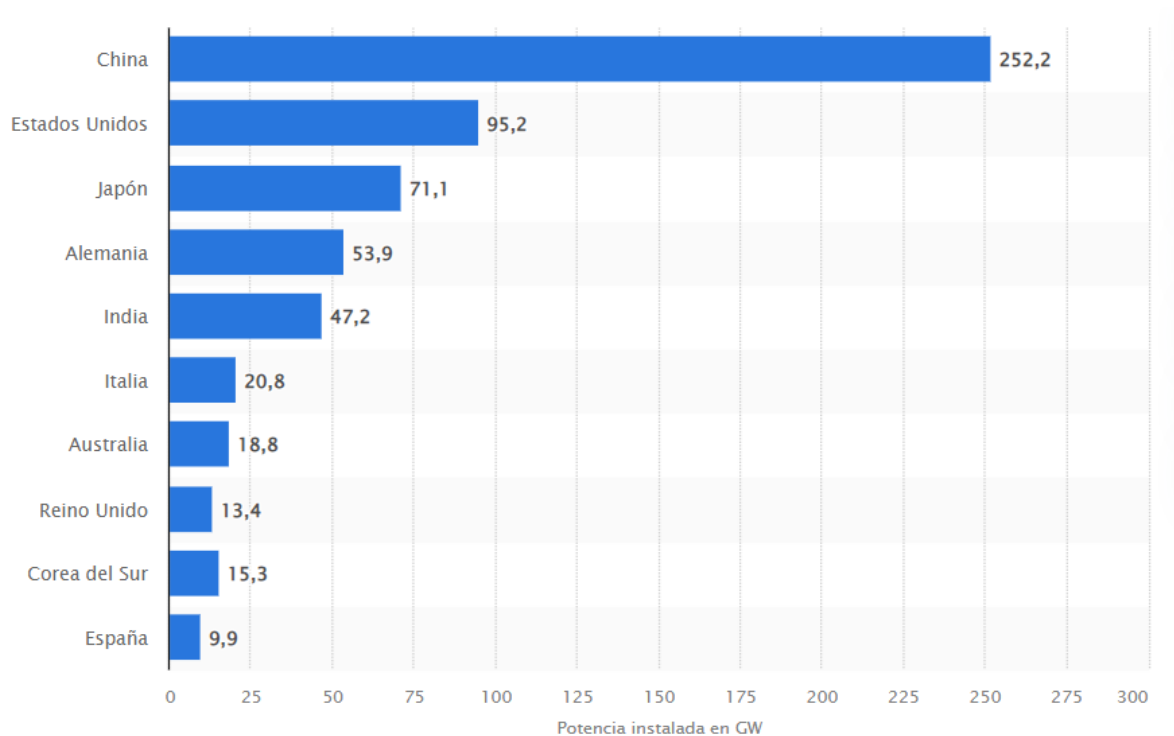
La generación de energía solar es la segunda fuente más importante de las energías renovables no convencionales a nivel mundial, después de la generación de energía eólica. Sin embargo, para el año 2020 se ha puesto casi al mismo nivel, gracias a que se registraron importantes incrementos de capacidad en China (49 GW), Vietnam (11 GW), Japón también sumó más de 5 GW, la India y la República de Corea ampliaron su capacidad solar en más de 4 GW. Estados Unidos de América agregó 15 GW (IRENA, 2021b).

China es líder en instalaciones solares con más del 35% de la capacidad instalada mundial y le sigue Estados Unidos con el 10,6%. A pesar de una caída del 4,5% en la demanda mundial de energía en 2020, las tecnologías de energía renovable mostraron un progreso prometedor. Según los autores, a pesar de que el crecimiento de las energías renovables fue fuerte en todas las fuentes, la energía solar lideró desde el frente con 127 GW instalados en 2020, su mayor expansión de capacidad anual, llegando así a una capacidad instalada a nivel mundial de 713,97 GW (6, 2021).

En la Figura 5 se muestra el ranking de los países con mayor potencia solar fotovoltaica instalada a 2020.

Figura 5

Ranking de países con mayor potencia solar fotovoltaica instalada



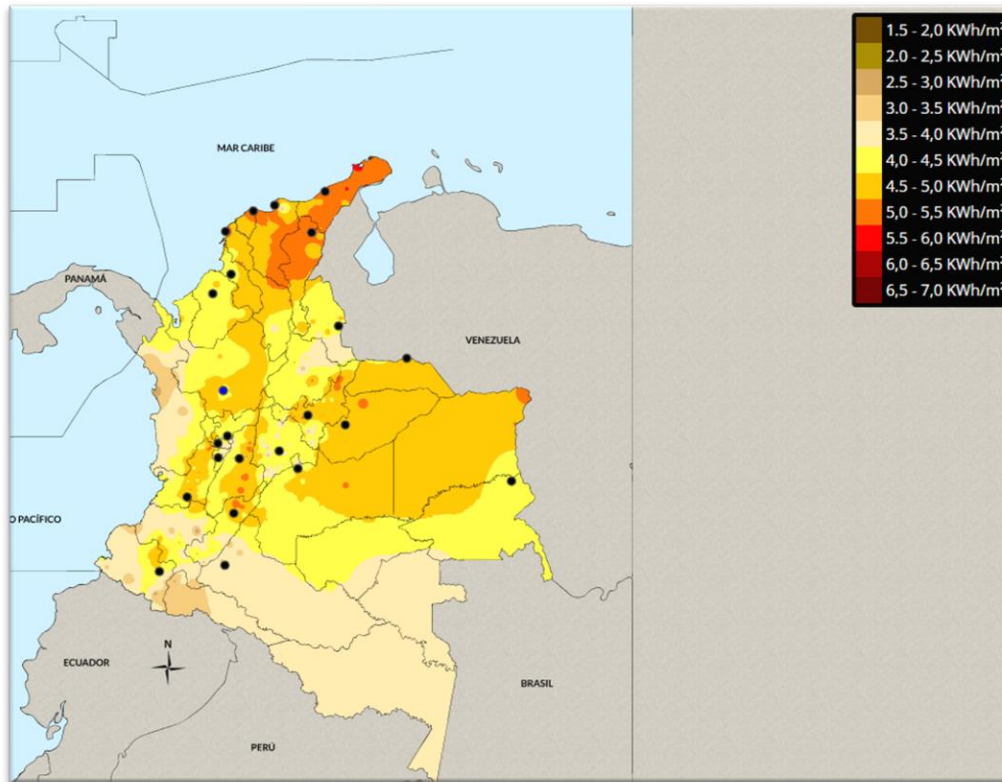
Nota. Tomado de <https://es.statista.com/estadisticas/641225/potencia-solar-fotovoltaica-instalada-por-paises/>

2.6 Energía solar fotovoltaica en Colombia

Colombia por ser un país ubicado muy cerca del ecuador, no tiene estaciones y durante todo el año mantiene un rango de temperatura muy estable. Por esta razón en el país se tiene una densidad de energía promedio de 4,5 kWh/m² día y de acuerdo con el atlas de radiación solar, el cual se muestra en la Figura 6, regiones como la Guajira, gran parte de la Costa Atlántica y sectores específicos de Arauca, Vichada, Meta y Casanare se tienen valores que superan el promedio de densidad de energía del país llegando hasta 6 kWh/m² día (González Estrada et al., 2015).

Figura 6

Densidad de energía solar en Colombia



Nota. Tomado de <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>

La capacidad instalada total en Colombia para el año 2020 en energía solar fotovoltaica, llegó a 109,6 MW (IRENA, 2021a).

Para el mes de junio de 2020 se tenía un total de 885 proyectos registrados en la UPME, con una capacidad instalada de 16.446,73 MW, equivalente al 18% del total de proyectos (UPME, 2021). La participación en la generación de energía en el sistema interconectado nacional (SIN) para el mes de agosto de 2021 de la fuente solar fotovoltaica fue del 0,41%, lo que equivale a 25,81 GWh y la generación promedio diaria para este mismo periodo fue 0,83 GWh (Expertos en Mercados - XM S.A. E.S.P, 2021).

Teniendo en cuenta lo descrito en el párrafo anterior se puede evidenciar que Colombia le está apostando fuertemente a la energía solar fotovoltaica y tiende seguir creciendo estos indicadores de capacidad instalada y generación a través de esta tecnología. Dado esto, en este trabajo se abordará el estudio de un factor clave en el rendimiento de las celdas solares, el cual es la temperatura, debido que cuando se comienza a incrementar, la eficiencia de las celdas solares disminuye. En este trabajo se realiza una revisión bibliográfica de la literatura disponible para

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

analizar las diferentes tecnologías de refrigeración, las cuales impactan directamente la eficiencia de los módulos solares.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

3. METODOLOGÍA

El trabajo fue desarrollado mediante una revisión bibliográfica realizada a través de libros, tesis de grado y artículos. La búsqueda de la información se realizó en páginas web, Google Académico y en las bases de datos disponibles, a través del acceso desde el sistema de biblioteca de la institución universitaria Instituto Tecnológico Metropolitano, las cuales fueron Science Direct, IEEE, Science.gov y Scopus.

Inicialmente para establecer el efecto de la temperatura en la eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos se utilizaron las palabras clave “solar cell”, “temperature” “efficiency”, “photovoltaic solar panel”, “effect”, “PV cell”. Se utilizaron alrededor de 40 referencias, dado que inicialmente se definió los tipos de celdas solares, rangos de eficiencia, modelos circuitales de las celdas solares de un diodo, dos diodos y el modelo Bishop, el cual se utiliza cuando la celda solar sufre sombras parciales. También se mostraron los parámetros más afectados con el incremento de la temperatura y como afecta la potencia y la eficiencia de las celdas solares, y al final se pudo determinar el modelo matemático más utilizado para establecer la eficiencia de una celda solar teniendo en cuenta la temperatura de operación.

Para las tecnologías de refrigeración se definieron seis tecnologías, las cuales fueron agua, aire, combinación agua y aire, PCM, nanofluidos y tubos de calor, por ser las más comunes en la literatura para la refrigeración de paneles solares. Para la búsqueda de información se utilizaron las palabras clave “PVT systems”, “solar cell”, “PV cell”, “efficiency”, “temperature”, “cooling”, “refrigeration”, “water”, “air”, “nanofluids”, “heat pipes”, “PCM”. Se analizaron alrededor de 17 referencias que contenían información sobre la configuración y funcionamiento en los paneles solares fotovoltaicos. Para los nanofluidos, PCM y tubos de calor se encontró información adicional como clasificación, datos teóricos, tipos y algunos puntos a favor y en contra de cada tecnología. Con estos datos se logró construir una descripción general de la configuración y funcionamiento de cada una de las tecnologías de refrigeración planteadas.

Con el fin de establecer el impacto de la refrigeración sobre los paneles solares fotovoltaicos se realizó la revisión de 32 artículos adicionales y se realizó un resumen tipo tabla teniendo en cuenta solo los documentos donde se realizó un experimento único. En la tabla se relacionó el tipo de tecnología de refrigeración utilizada, datos generales del experimento y el resultado obtenido en cuanto al aumento de la eficiencia. Adicional a esto se mostraron los datos en forma gráfica para facilitar la visualización de la información, lo que permitió generar algunas conclusiones importantes de cada una de las tecnologías de refrigeración.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A través de los años la eficiencia de las celdas solares ha sido un gran desafío para los fabricantes de estos dispositivos. Aunque en el presente se tienen eficiencias alrededor de 28% (Salameh et al., 2021) a nivel laboratorio para las celdas de silicio monocristalino, una de las más comerciales, sigue siendo muy baja. Actualmente hay investigaciones en otros tipos de celdas solares, las cuales son muy prometedoras, pero aún se encuentran en etapa de desarrollo a nivel de laboratorio.

La temperatura de operación es un factor muy influyente en la eficiencia de las celdas solares, por esta razón, en esta sección del trabajo se pretende mostrar cómo afecta la temperatura la eficiencia de las celdas solares, tecnologías de refrigeración para los módulos fotovoltaicos y como se mejora la eficiencia con estas aplicaciones.

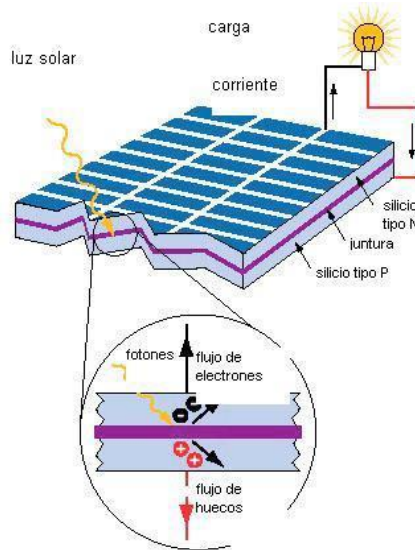
4.1 EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA EFICIENCIA DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS

4.1.1 Generalidades

La energía solar fotovoltaica se basa en la utilización de celdas solares fabricadas con materiales semiconductores, las cuales, por efecto fotoeléctrico, generan corriente eléctrica cuando sobre estos incide la radiación solar. El silicio es la base de la mayoría de los materiales más ampliamente utilizados en el mundo para la construcción de celdas solares (González et al., n.d.). En la Figura 7 se muestra la estructura de una celda solar .

Figura 7

Estructura de una Celda Solar



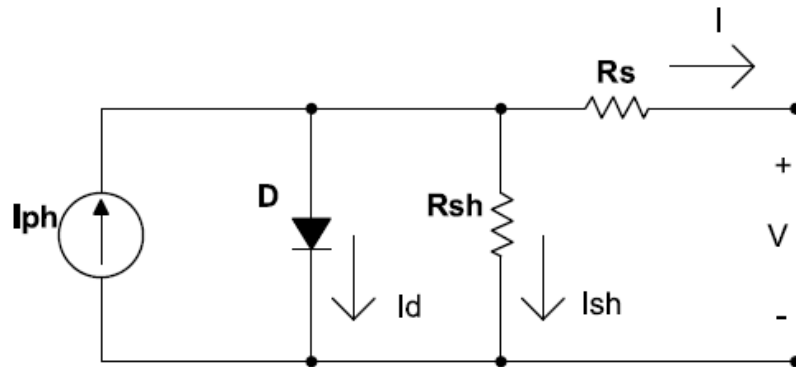
Nota. tomado de <https://www.researchgate.net>

La captación de la radiación solar se lleva a cabo a través de un panel, el cual está integrado por un conjunto de celdas solares que se conectan en serie y paralelo con el propósito de lograr unos determinados niveles de tensión e intensidad eléctrica, para una radiación dada (González et al., n.d.).

Para evaluar acertadamente el funcionamiento de una celda solar, se hace necesario realizarlo mediante una representación eléctrica, la cual se encuentra en función principalmente de la radiación solar y de la temperatura de la celda. Existen varios modelos para evaluar el comportamiento de una celda solar, el más estandarizado y que ofrece un nivel de confiabilidad muy aceptado es el modelo circuital de un diodo. Este modelo consta de una fuente de corriente foto generada por acción de la radiación solar (I_{ph}), un diodo (D), una resistencia en paralelo (R_{sh}) y una resistencia en serie (R_s), la cual representa a la resistencia interna del material al flujo de la corriente (Granda-Gutiérrez et al., 2013), como se muestra en la Figura 8.

Figura 8

Representación Eléctrica de una Celda Solar

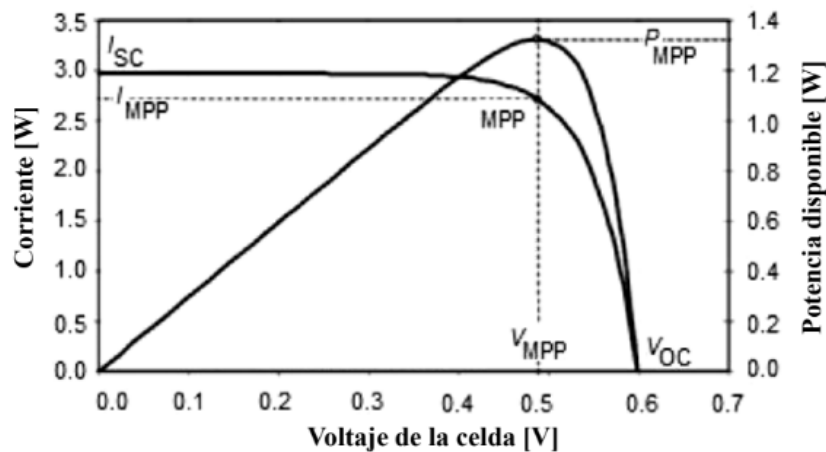


Nota. Tomado de *Evaluación del desempeño de los modelos de un diodo y dos diodos para módulos fotovoltaicos*. 41(36), 152–170.

Las características operativas típicas de una celda solar por lo general se representan mediante gráficas corriente – voltaje (I-V) y potencia – voltaje (P-V). En la Figura 9 se puede observar los puntos más característicos de las curvas, la corriente de cortocircuito (I_{sc}), el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), el punto de máxima potencia (MPP), la corriente en el punto de máxima potencia (I_{MPP}), el voltaje en el punto de máxima potencia (V_{MPP}) y la potencia en el punto de máxima potencia (P_{MPP}) (Granda-Gutiérrez et al., 2013).

Figura 9

Curva voltaje – corriente y voltaje – potencia de una Celda Solar



Nota. Tomado de *Modelado y Simulación de Celdas y Paneles Solares*. ISSN:1405-2172. *Congr. Int. Ing. Electrón. Mem. Electro 2013, September 2014*, 17–22. <https://doi.org/10.13140/2.1.4192.8968>

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

La corriente total I se representa en función de la corriente fotogenerada I_{ph} , la corriente del diodo I_d y la corriente de la resistencia R_{sh} , como se muestra en la Ecuación 2

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2)$$

$$I_d = I_o \left[e^{\frac{q(V+IR_S)}{a}} - 1 \right] \quad (3)$$

$$I_{sh} = \frac{V+IR_S}{R_{sh}} \quad (4)$$

El modelo matemático de un diodo se resume como se muestra en la Ecuación 5

$$I = I_{ph} - I_o \left[e^{\frac{q(V+IR_S)}{a}} - 1 \right] - \frac{V+IR_S}{R_{sh}} \quad (5)$$

Donde,

I_{ph} corriente fotogenerada

I_o corriente de saturación del diodo

R_s resistencia en serie

R_{sh} resistencia en paralelo

V voltaje

q carga de un electrón ($1,6 \times 10^{-19} C$),

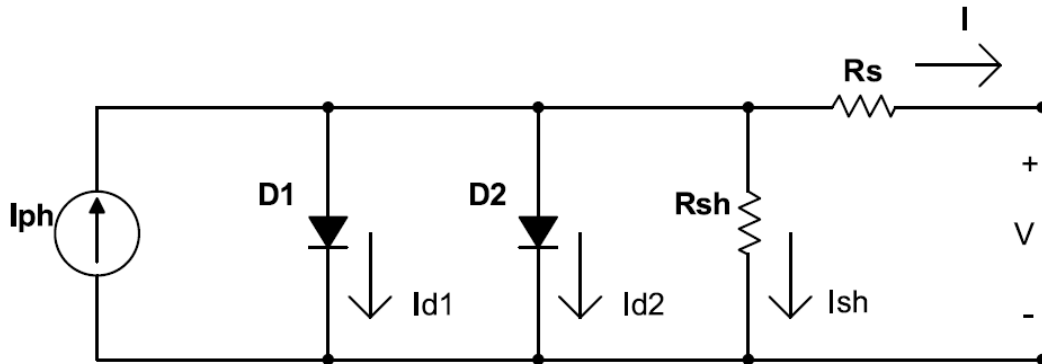
a parámetro dado por la ecuación: $a = kTcA$

k constante de Boltzman ($1,38 \times 10^{-23} J/K$)

Otro de los modelos utilizados para evaluar el comportamiento de una celda solar es el de doble diodo, el cual matemáticamente tiene un nivel de complejidad superior que el modelo de un diodo, puesto que tiene en cuenta el fenómeno de la recombinación, aumentando así la exactitud en la curva I-V y P-V. Se caracteriza por ser más preciso para valores de irradiación bajos y permitir las simulaciones para condiciones dinámicas de temperatura (Ortiz Núñez et al., 2020). El circuito equivalente se muestra en la Figura 10.

Figura 10

Representación del circuito eléctrico de una celda solar con el modelo de dos diodos



Nota. Tomado de *Evaluación del desempeño de los modelos de un diodo y dos diodos para módulos fotovoltaicos*. 41(36), 152–170.

La corriente de salida de la celda se presenta en la Ecuación 6, donde I_{d1} e I_{d2} se expresan de forma similar a la Ecuación 3.

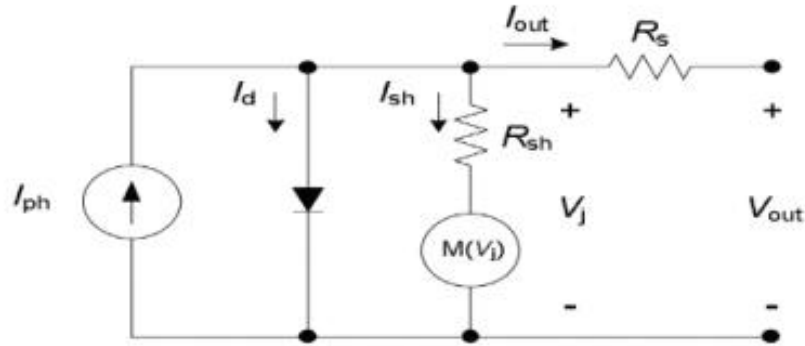
$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (6)$$

Existe un modelo conocido como modelo de Bishop, el cual evalúa las condiciones cuando las celdas solares se exponen a sombras parciales, dado que esta condición puede afectar en gran medida el rendimiento de las celdas, ocasionando pérdidas de potencia entre 40% y 100%, aunque la sombra solo sea parcial (Víctor González Zamora, 2020). Lo que ocasiona este efecto es que en la celda no haya corriente fotogenerada, la celda comienza a operar en la región de polarización inversa lo que ocasiona que comience a circular una corriente por la R_{SH} haciendo que esta celda consuma potencia en vez de entregarla. Adicionalmente se presenta el fenómeno de punto caliente, lo cual reduce la potencia de salida y conlleva a la degradación de esta. Esto puede significar una condición de operación peligrosa ya que pueden presentarse daños irreversibles o destrucción total de las celdas y paneles. Para contrarrestar este efecto se conecta un diodo de derivación a través de cada cadena en serie de celdas para asegurar la continuidad del suministro de energía de carga parcial durante el sombreado. En la Figura 11 se muestra el circuito equivalente de una celda solar representada con el modelo de Bishop, en el que se incluye un término de multiplicación adicional $M(V_j)$ para la corriente inversa que se inserta en la rama de derivación para que se conecta en serie con la resistencia R_{sh} (Belhadj et al., 2017).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Figura 11

Circuito equivalente celda solar modelo Bishop



Nota. Tomado del artículo “Global maximum power point tracking based on ANFIS approach for PV array configurations under partial shading conditions”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77(September 2016), 875–889. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.056>

Las Ecuaciones 7 a 10 expresan matemáticamente el modelo circuital de Bishop. En comparación a los demás modelos mencionados, se identifica fácilmente el aumento en la complejidad del análisis debido a la inclusión de nuevos parámetros como la constante a que representa la fracción de corriente óhmica relacionada con el semiconductor y n que corresponde al exponente de avalancha (J. Bishop, 1988).

$$I_{sh} = \frac{V_j}{R_{sh}} \left[1 + a \left(1 - \frac{V_j}{V_{br}} \right)^{-n} \right] \quad (7)$$

$$I_{out} = I_{ph} - I_o \left[e^{\left(\frac{qV_j}{nKT_{cell}} \right)} - 1 \right] - I_{sh} \quad (8)$$

$$V_{out} = V_j - I_{out}R_s \quad (9)$$

$$V_j = V_{out} + I_{out}R_s \quad (10)$$

Donde,

I_{ph} corriente fotogenerada

I_d corriente del diodo

R_s resistencia en serie

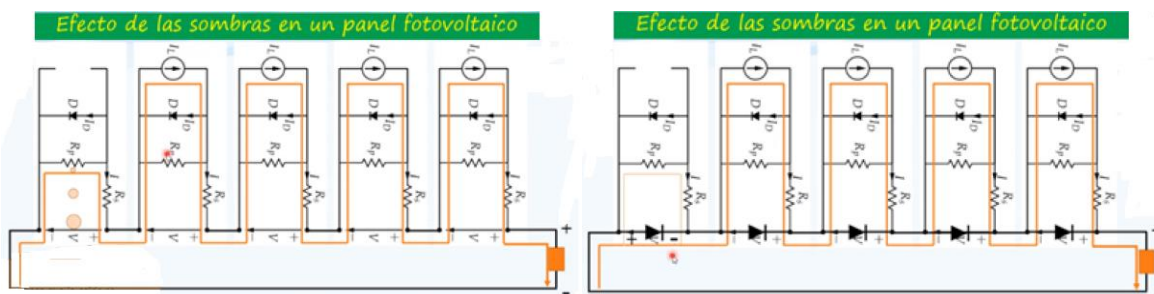
R_{sh} resistencia en paralelo

I_{sh} corriente resistencia paralelo
 I_o corriente de saturación del diodo
 T_{cell} temperatura de la celda en Kelvin
 k constante de Boltzman
 n factor de idealidad
 q carga de un electrón
 V_j Voltaje en el término de derivación
 I_{out} corriente de salida de la celda solar
 V_{out} voltaje de salida de la celda solar
 V_{br} voltaje de ruptura

Para comprender de una manera más fácil el fenómeno de sombras parciales sobre las celdas solares en la Figura 12 se muestra un arreglo de celdas (representando un panel solar) sin diodo de derivación (izquierda) y con diodo de derivación (derecha), donde se puede evidenciar que, sin el diodo de derivación, comienza a circular corriente por la resistencia en paralelo de la primera celda a la izquierda de la imagen, causando que se consuma potencia por este elemento y convirtiéndose en un punto caliente, lo que conlleva al daño de la celda. Mientras que con el diodo de derivación se puede contrarrestar este fenómeno.

Figura 12

Representación gráfica del efecto de sombras parciales en un panel solar fotovoltaico



Nota. Tomado de Efecto sombra en los paneles solares 1. CITE Energía

4.1.2 Eficiencia de una celda PV

De acuerdo con los modelos revisados se pueden establecer los parámetros relacionados con la operación de una celda solar y teniendo en cuenta esto se puede comenzar a hablar del término eficiencia. La eficiencia eléctrica de una celda solar depende principalmente del tipo de celda utilizada. Un módulo fotovoltaico típico convierte en electricidad entre el 6% y el 20% de la radiación solar incidente, dependiendo del tipo de celda solar y de las condiciones climáticas (Dubey et al., 2013).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

La eficiencia de una celda solar se expresa en la Ecuación 12 y se determina como la relación entre la potencia que obtenemos de la celda solar $P_{m\acute{a}x}$, definida en la Ecuación 11 y la potencia de entrada P_{in} , la cual se determina como la radiación solar a condiciones estándar 1000 W/m² por el área de la celda.

$$P_{m\acute{a}x} = V_{oc}I_{sc}FF \quad (11)$$

$$\eta = \frac{V_{oc}I_{sc}FF}{P_{in}} \quad (12)$$

Donde,

V_{oc} es la tensión en circuito abierto

I_{sc} es la corriente de cortocircuito

FF es el factor de forma

η es la eficiencia

A continuación, se definen los parámetros principales que están relacionados con la eficiencia de una celda fotovoltaica:

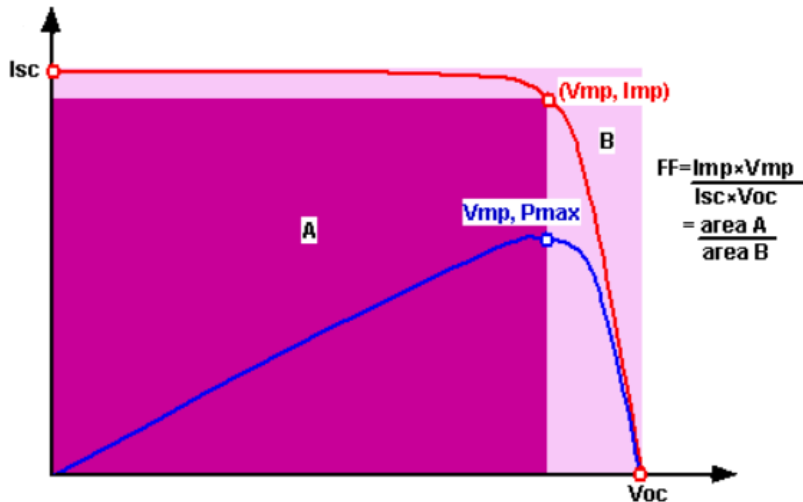
La tensión de circuito abierto (V_{oc}): Es la tensión para la que los procesos de recombinación igualan a los de generación y, por lo tanto, la corriente que se extrae de la celda es nula; constituye la máxima tensión que se puede extraer de una celda solar. En las células de Si de tipo medio es del orden de 0,6 V mientras que en las de GaAs es de 1 V (González et al., n.d.).

La corriente de cortocircuito (I_{sc}): Es la corriente que se obtiene de la celda cuando la tensión en sus bornes es cero voltios; es la máxima corriente que se puede obtener de la celda (González et al., n.d.).

Factor de forma (FF): Se define como la relación de la potencia máxima de la celda solar para el producto de V_{oc} y I_{sc} . En la Figura 13 se muestra que el FF es una medida del área del rectángulo más grande que se ajuste en la curva I-V (PVEDUCATION, 2022).

Figura 13

Curva I - V y P - V



Nota. Tomado de PVEducation. Publicación WEB. <https://www.pveducation.org/>

La tecnología fotovoltaica basada en silicio, aunque es la más madura, no es la única disponible en el mercado actualmente. De acuerdo con el material utilizado para la construcción de los paneles solares fotovoltaicos, los métodos de proceso de fabricación, el nivel de temperatura y la eficiencia, se puede clasificar en tres generaciones. La celda solar basada en silicio fue la primera generación, la segunda generación es la de celdas de película delgada (Thin-Film), mientras que la tercera generación son celdas de perovskita, orgánicas y sensibilizadas con colorantes. Esta última sigue siendo objeto de intensa investigación y desarrollo (Salameh et al., 2021).

A continuación, se describen las principales características de algunas tecnologías de celdas solares. Sin embargo, se aclara que el alcance de este trabajo solo hace referencia a las celdas solares más comerciales y de uso en investigación, las cuales son celdas de silicio monocristalinas, policristalinas y de capa fina (Thin-Film).

Celdas solares de silicio

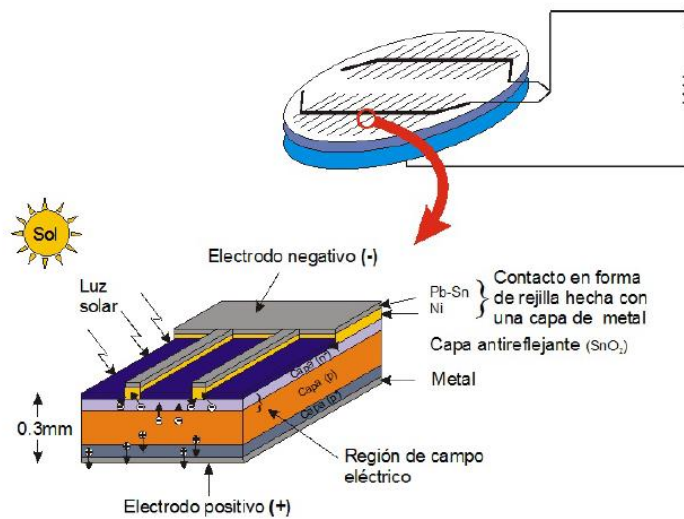
Las celdas solares de silicio son dispositivos semiconductores de la familia de diodos, es decir, se forma de un ánodo y un cátodo. Normalmente se emplea la unión n-p, por ser la más estable. El sustrato puede ser tipo-n o tipo-p. Sin embargo, como los portadores minoritarios del material tipo

p, es decir, los electrones poseen mayor longitud de difusión (comparados a los huecos en el material tipo-n), generalmente se utiliza el material tipo-p (Matsumoto, 2011).

Celdas Solares Monocristalinas: están hechas de un solo cristal de silicio puro, este se purifica, se funde y se cristaliza en lingotes, los cuales son cortados en finas láminas para hacer celdas individuales. Las celdas monocristalinas tienen un color uniforme, generalmente azul o negro (Carrasco, 2014). Este tipo de panel garantiza un rendimiento superior al resto de tecnologías, debido a que los átomos de silicio están situados en una posición predeterminada, facilitando la conductividad. Sin embargo, el proceso de fabricación es más largo y costoso (Solar-Energía, 2022). El rendimiento comercial de este tipo de células oscila entre el 16 % y 18 % y a nivel laboratorio alcanza una eficiencia del 27,6% (Salameh et al., 2021). En la Figura 14, se muestra la estructura de una celda solar monocristalina básica de unión n-p.

Figura 14

Estructura Celda Solar Monocristalina



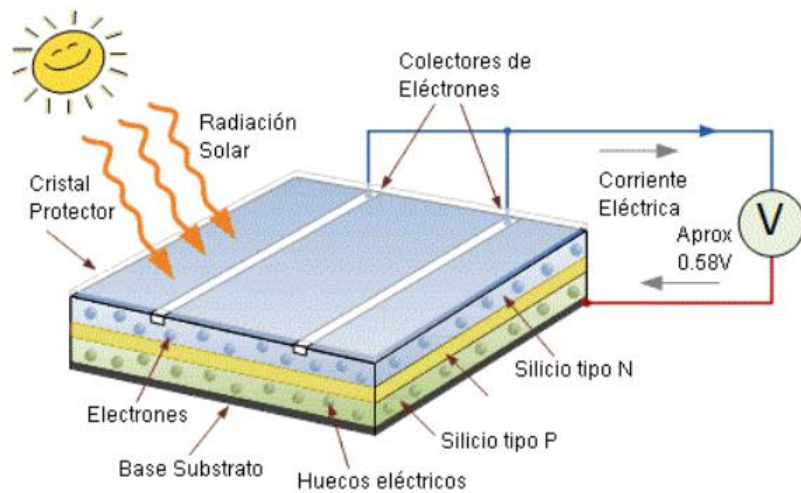
Nota. Tomado de CELDAS SOLARES DE SILICIO: FUNDAMENTO Y TENDENCIA. *Division de Ciencias e Ingeniería Universidad de Quintana Roo, 1954, 44.*

Celdas Solares Policristalinas: Estas provienen de diferentes cristales de silicio en lugar de uno. Las celdas policristalinas se fabrican de forma similar a las monocristalinas. La principal diferencia es que las técnicas de producción son más simples, por ende, más económicas (Pveducation, 2022). Debido a la menor calidad del material, la eficiencia es inferior a la de una celda monocristalina, tan es así, que el récord de eficiencia a nivel laboratorio de una celda solar policristalina es 22,3 %, (Salameh et al., 2021) pero los fabricantes se defienden argumentando que el precio por kW

generado es menor (González et al., n.d.). En la Figura 15, se muestra la estructura de una celda solar policristalina.

Figura 15

Estructura Celda Solar Policristalina



Nota. Tomado de <http://megas.com.do/index.php/2017/01/16/las-tecnologias-de-las-celdas-solares/>

Celdas solares de capa fina (Thin film)

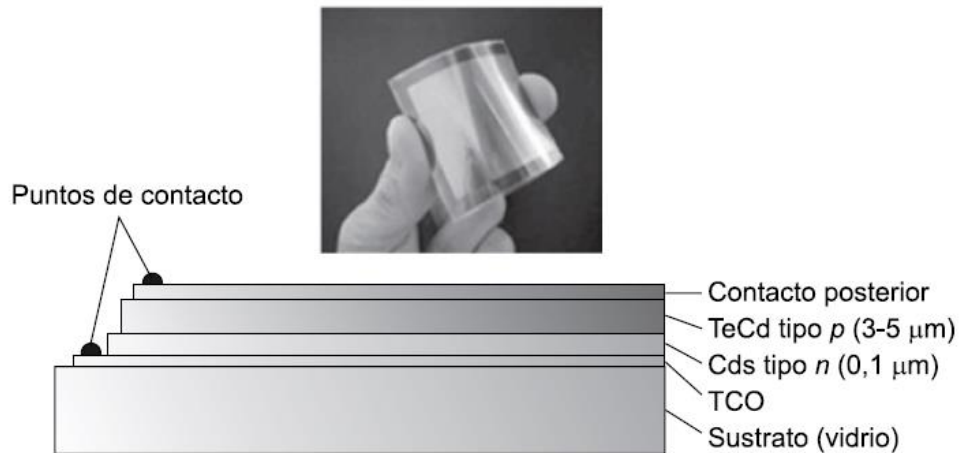
Los paneles de película fina se caracterizan por tener capas muy finas que son lo suficientemente delgadas para ser flexibles. Los principales materiales para la construcción de este tipo de paneles son silicio amorfo (a-Si), telururo de cadmio (CdTe) y cobre seleniuro de indio y galio (CIGS). Durante los últimos años las eficiencias de las celdas CdTe y CIGS a nivel de investigación se aproximan o superan la eficiencia de la célula de silicio policristalino 22,1 % y 22,9 % respectivamente. La eficiencia de a-Si llega solo al 14% (Salameh et al., 2021).

Una de las grandes ventajas de este tipo de celdas respecto a las de silicio monocristalino y policristalino es que su rendimiento se ve menos afectado por la temperatura, gracias a que los coeficientes de temperatura son más bajos. Para las celdas de silicio cristalino el coeficiente de temperatura está en el rango de $-0,4\% - 0,5\%$ por $^{\circ}\text{C}$, y para las celdas de película delgada (dependiendo del tipo de material), el coeficiente de temperatura es mucho menor, por ejemplo para el silicio amorfo o el telururo de cadmio, los coeficientes de temperatura están en el rango de $-0,2 - 0,3\%$ por $^{\circ}\text{C}$ (Salameh et al., 2021). En la Figura 16 se muestra una representación de las capas de una celda de Telururo de cadmio (CdTe) y sulfuro de cadmio (CdS).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Figura 16

Celda de Teluro de cadmio (CdTe) y sulfuro de cadmio (CdS)



Nota. Tomado del libro *Centrales de energías renovables*

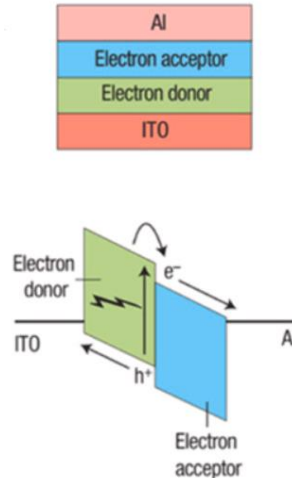
Celdas solares orgánicas

Están basadas en un nuevo material orgánico en el que se destacan los polímeros. Esta tecnología aún se encuentra en desarrollo. Los investigadores alrededor del mundo trabajan para crear celdas orgánicas más sustentables para dispositivos energéticos, pues son más fáciles de reciclar en el fin de su ciclo de vida. Las celdas solares orgánicas han evolucionado en los últimos años, por presentar ventajas como: bajo precio de fabricación, elaboración de dispositivos más livianos, de menor dimensión y mayor flexibilidad. Por otro lado, hay varios aspectos por mejorar, como su baja eficiencia de conversión, su menor estabilidad referente a la vida útil. En comparación con los paneles solares de silicio, los costos de fabricación de las celdas orgánicas son menores, pero su eficiencia no iguala a estas, por tal razón, las celdas basadas en silicio dominan el mercado mundial. Con respecto al medio ambiente, las celdas solares orgánicas generan menor impacto, dado a su bajo consumo energético en el proceso de fabricación por generar menor cantidad de desechos y materiales tóxicos (Fagua & Bernal S., 2015). En la Figura 17 se presenta la estructura de una celda solar orgánica bicapa.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Figura 17

Estructura Celda Solar Orgánica Bicapa



Nota. Tomado del artículo “Review of solar photovoltaic cooling systems technologies with environmental and economical assessment”. *Journal of Cleaner Production*, 326(October), 129421. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129421>

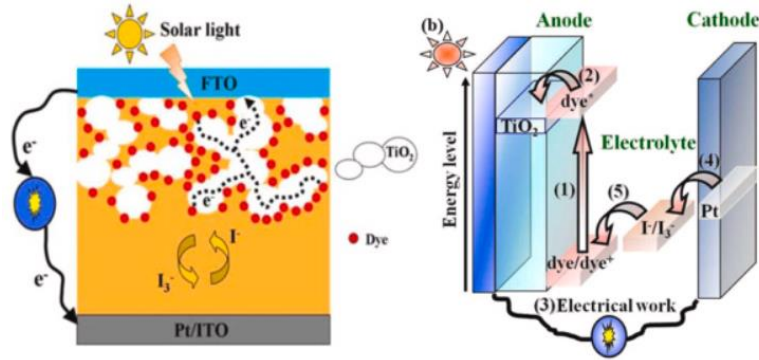
Celdas solares sensibilizadas por colorantes

Consisten en electrodos de óxido de metal nanoestructurados (como TiO₂ nanocristalino/nanoporoso) cubiertos con colorantes sensibilizantes, (por ejemplo, rutenio-polipiridina) y electrolitos líquidos de yoduro/triyoduro. Cuando los fotones golpean el tinte, pueden liberar electrones de sus enlaces conjugados para formar corriente eléctrica desde el ánodo a través del circuito externo y de regreso al cátodo de platino para ser transportada internamente de regreso al tinte a través del electrolito. Tiene un récord de eficiencia de conversión del 11,9%. Ofrecen celdas baratas, flexibles y semitransparentes. Sin embargo, las principales desventajas de esta tecnología están relacionadas con el uso de electrolitos líquidos, los cuales son vulnerables a fugas, expansión o congelación en condiciones de temperatura extraordinarias (Shubbak, 2019). En la Figura 18 se muestra el esquema típico de una celda sensibilizada por colorante.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Figura 18

Esquema típico de una celda solar sensibilizada por colorantes



Nota. Tomado del artículo “Review of solar photovoltaic cooling systems technologies with environmental and economical assessment”. *Journal of Cleaner Production*, 326(October), 129421. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129421>

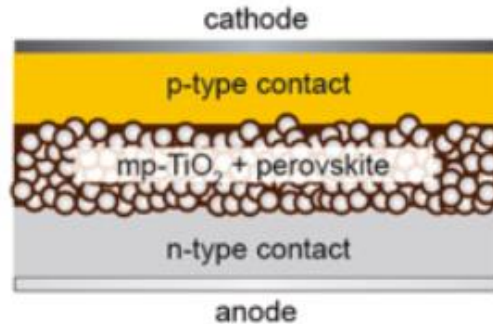
Celdas solares de perovskita

El uso de un material de perovskita cuya estructura cristalina de ABX_3 , (donde A es un catión voluminoso orgánico o inorgánico como el metilamonio o el cesio, B es un catión metálico como el plomo y X un anión haluro como el bromo o el yodo), como absorbente de luz en celdas solares ha demostrado una alta eficiencia y una conductividad portadora de carga prometedoras. En solo unos años, la tecnología ha sido testigo de una mejora significativa en la eficiencia del 3,8% en 2009 al 24,2% en 2019. Además, las celdas tándem de perovskita/silicio lograron un récord de eficiencia del 28% en 2019. Las celdas de perovskita ofrecen un bajo costo de producción y procesos de fabricación relativamente simples. Sin embargo, la incorporación de plomo y la sensibilidad a las altas temperaturas, la humedad y el oxígeno se consideran obstáculos de estabilidad frente a esta tecnología (Shubbak, 2019). En la Figura 19 se muestra la estructura de una celda solar de Perovskita sensibilizada.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Figura 19

Estructura celda de Perovskita sensibilizada



Nota. Tomado del artículo “Review of solar photovoltaic cooling systems technologies with environmental and economical assessment”. *Journal of Cleaner Production*, 326(October), 129421. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129421>

El mejoramiento de la eficiencia de las celdas solares es un objetivo en desarrollo por los diferentes fabricantes, actualmente las celdas solares más eficientes y comerciales son las de silicio monocristalino con 27,6%, seguida de las cobre seleniuro de indio y galio (CIGS) 23,4%, luego están las de silicio policristalino 23,3% y por último las de telururo de cadmio (CdTe) 22,1%, todas estas eficiencias a nivel de laboratorio (NREL, 2022).

4.1.3 Impacto de la temperatura en paneles solares fotovoltaicos

La exploración del rendimiento de una celda solar indica que la temperatura de funcionamiento de la superficie actúa como el elemento más crítico durante el proceso de conversión de energía (Kandeal et al., 2020).

A medida que aumenta la temperatura, el material semiconductor experimenta una reducción en la banda prohibida, que corresponde a la energía mínima necesaria para excitar un electrón desde su estado ligado (banda de valencia) a un estado libre (banda de conducción) que le permita participar en la conducción. La disminución de la banda prohibida puede ser visto como el aumento de la energía de los electrones en el material, entonces son liberados a un potencial más bajo (PVeeducation, 2022) causando la reducción del V_{OC} . En la Tabla 1 se muestran los valores de banda prohibida para algunos materiales.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Tabla 1

Valores de banda prohibida semiconductores

Material	Eg (eV)
Silicio (Si)	1,14
Germanio (Ge)	0,67
Arseniuro de Galio (GaAs)	1,4
Fosforo de Galio (GaP)	2,25
Telurio (Te)	0,33
Sulfuro de Cadmio (CdS)	2,42
Telururo de Cadmio CdTe	1,45
Sulfuro de Cadmio (CdSe)	1,72
Óxido de Cobre (Cu ₂ O)	2,1
Dióxido de Titanio (TiO ₂)	3,0
Sulfuro de Cobre (Cu ₂ S)	1,2

Nota. Tomado de Fundamentos Celdas. *Fundamentos Fisicos de Las Celdas Solares*, 27–43.

De acuerdo con los valores de banda prohibida los materiales con un mejor ancho de banda prohibida son TiO₂, CdS, GaP. Sin embargo, el silicio que es el material más utilizado para la fabricación de celdas solares tiene un ancho de banda prohibida

Uno de los métodos de análisis de celdas solares es el modelo de un diodo, el cual contempla 5 parámetros, este no tiene un nivel de complejidad alto y tiene un gran grado de confiabilidad y aceptación para determinar estos valores. En la Tabla 2, se muestra las características generales de los parámetros de la celda solar y donde se puede observar cuales son afectados por la temperatura.

Tabla 2

Características generales de los parámetros de la celda solar

Tipo de parámetro	Afecta características de las curvas I–V y P–V	Dependiendo de la temperatura de la celda principalmente	Dependiendo del nivel de irradiancia principalmente	Es notable su efecto sobre la potencia máxima	Su efecto sobre la corriente de cortocircuito (Isc) es notable	Su efecto sobre el voltaje de circuito abierto (Voc) es notable
La fotocorriente, I_{ph}	X		X	X	X	X
La corriente de saturación del diodo, I_o	X	X		X	X	X
El factor de idealidad del diodo, n	X	X	X	X		

Tipo de parámetro	Afecta características de las curvas I-V y P-V	Dependiendo de la temperatura de la celda principalmente	Dependiendo del nivel de irradiación principalmente	Es notable su efecto sobre la potencia máxima	Su efecto sobre la corriente de cortocircuito (Isc) es notable	Su efecto sobre el voltaje de circuito abierto (Voc) es notable
La resistencia en serie, R_s	X	X	X	X		
La resistencia de derivación, R_{sh}	X	X	X			

Nota. Tomado del artículo “Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: A review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 494–509.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.051>

Si bien la mayoría de parámetros se afectan con el aumento de la temperatura, el más crítico es el V_{OC} (Kandael et al., 2020) porque impacta el punto de máxima potencia de la celda solar haciendo que este se reduzca. De acuerdo con la información presentada, en la Tabla 2 se observa que el voltaje de circuito abierto V_{OC} es afectado por la corriente de saturación del diodo I_o y según (Cata & Rodríguez, 2015) se indica que I_o aumenta con el incremento de la temperatura.

En la Ecuación 13 se puede observar que la corriente de saturación del diodo I_o es inversamente proporcional al voltaje de circuito abierto V_{OC} , debido a que cuando la I_o se hace más grande el valor de V_{OC} disminuye (PVeeducation, 2022) y a su vez reduciendo la potencia entregada por la celda solar.

$$V_{OC} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_o} + 1 \right) \quad (13)$$

Donde,

k constante de Boltzmann

I_{ph} fotocorriente generada

n factor de idealidad del diodo

I_o corriente de saturación del diodo

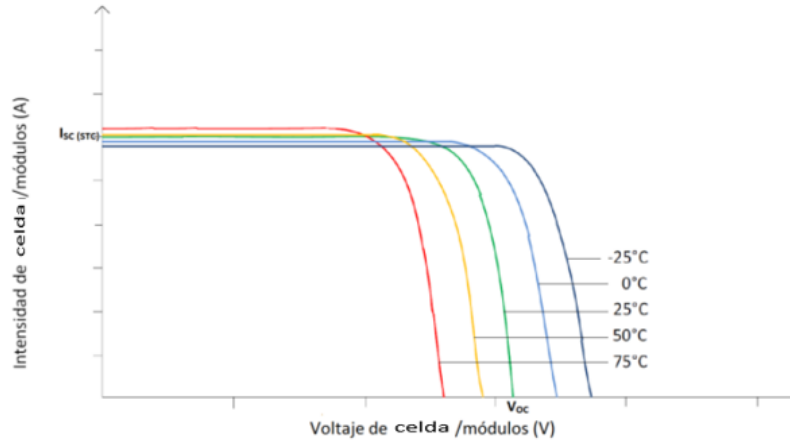
T temperatura

q carga de un electrón

El impacto en el V_{OC} con el aumento de la temperatura se muestra en la Figura 20.

Figura 20

Efecto de la temperatura en la curva V_{oc} - I_{sc}

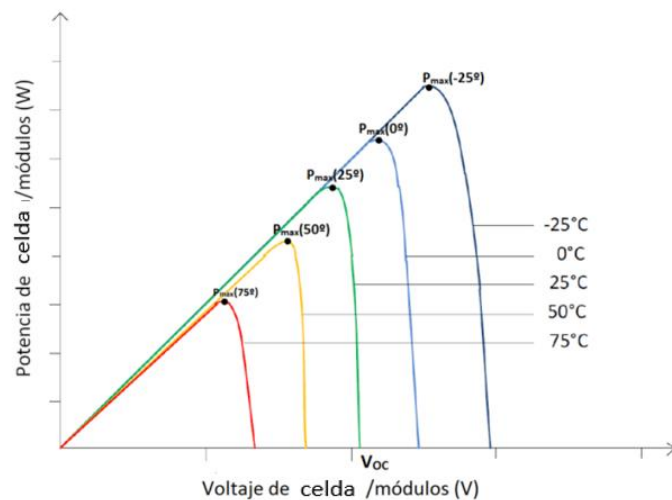


Nota. Tomado de <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/11/09/influencia-de-la-irradiacion-y-temperatura-sobre-una-placa-fotovoltaica/>

Analizando la imagen anterior se observa un aumento en la corriente de cortocircuito I_{SC} , lo que hace parecer que la potencia aumentaría, pero es más significativo la reducción del V_{OC} , lo que causa que el punto de máxima potencia $P_{máx}$ se reduzca con el aumento de la temperatura, como se muestra en la Figura 21.

Figura 21

Efecto de la temperatura en la curva P - V



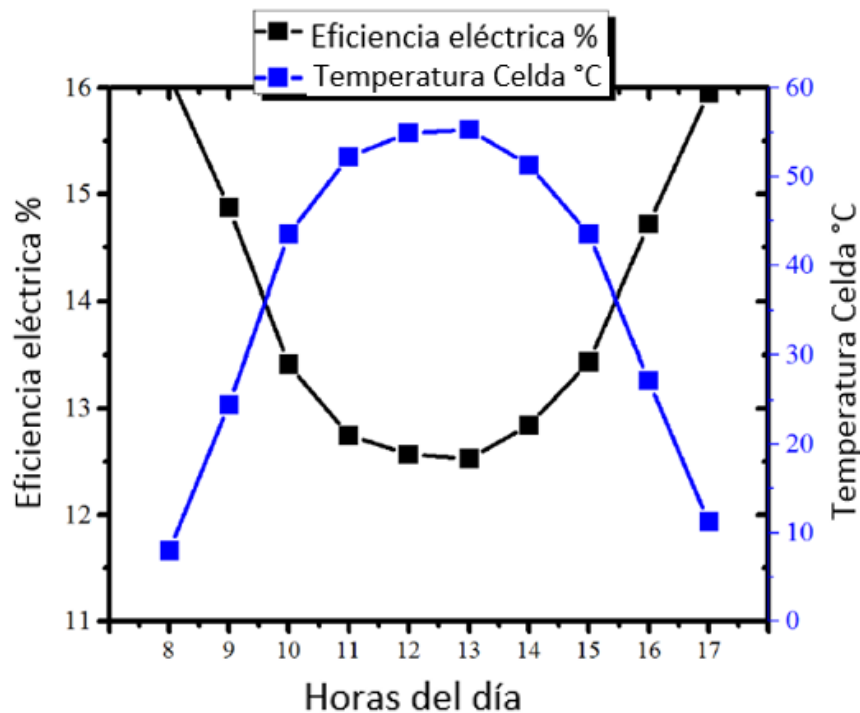
Nota. Tomado de <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/11/09/influencia-de-la-irradiacion-y-temperatura-sobre-una-placa-fotovoltaica/>

4.1.4 Modelos teóricos sobre la eficiencia de una celda solar

La potencia entregada por una celda solar se encuentra ligada al nivel de irradiancia que impacte sobre esta, cuando hay mayores niveles de irradiancia la potencia de salida de la celda aumenta, pero una de las grandes desventajas de la celda solar, es que su rendimiento disminuye por el aumento de la temperatura (Hamzat et al., 2021). En la Figura 22 se muestra la curva donde se evidencia que en las horas del día que se tiene mayor irradiancia, se aumenta la temperatura de la celda y la eficiencia disminuye.

Figura 22

Curva eficiencia - Temperatura de una celda solar



Nota. Tomado del artículo “Advances in PV and PVT cooling technologies: A review”. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47(May), 101360.

<https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101360>

La eficiencia de las celdas solares respecto a los cambios en la temperatura puede ser evaluada con la Ecuación 14, la cual representa la expresión lineal tradicional para la eficiencia eléctrica fotovoltaica (Skoplaki & Palyvos, 2009).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

$$\eta_c = \eta_{T_{ref}} \left[1 - \beta_{T_{ref}} (T_c - T_{ref}) + \gamma \log_{10} G_T \right] \quad (14)$$

Donde,

$\eta_{T_{ref}}$ eficiencia eléctrica del módulo a la temperatura de referencia

$\beta_{T_{ref}}$ coeficiente de temperatura

γ coeficiente de radiación solar

G_T flujo de radiación solar

T_{ref} temperatura de referencia

T_c temperatura de operación del módulo

Sin embargo, y de acuerdo con (Kandeal et al., 2020), (Dubey et al., 2013), (Skoplaki & Palyvos, 2009) el coeficiente de radiación solar generalmente se toma como cero y la ecuación se reduce a la siguiente expresión.

$$\eta_c = \eta_{T_{ref}} \left[1 - \beta_{T_{ref}} (T_c - T_{ref}) \right] \quad (15)$$

Los parámetros de referencia relacionados en las ecuaciones anteriores son tomados con valores estándar de temperatura y radiación solar de 25°C y 1000 W/m² respectivamente (Skoplaki & Palyvos, 2009).

(Dubey et al., 2013) y (Skoplaki & Palyvos, 2009) proponen diversos modelos que representan ecuaciones de trabajo simplificadas que se aplican a los módulos fotovoltaicos o a los conjuntos fotovoltaicos. En ellas intervienen variables ambientales básicas y parámetros numéricos que no sólo dependen del material, sino también del sistema, entre estos valores se encuentra el coeficiente de absorción, factor de corrección de espectro, valores promedio de temperatura, coeficiente global de la celda solar, entre otros. Sin embargo el modelo más utilizado de acuerdo con (Gharzi et al., 2020), (Kandeal et al., 2020), (Dubey et al., 2013) y (Skoplaki & Palyvos, 2009) es el que expresado en la Ecuación 15.

Una de las variables incluidas dentro de la Ecuación 15 es el coeficiente de temperatura de $P_{máx}$ ($\beta_{T_{ref}}$), el cual es negativo, dado que al subir o bajar un grado de temperatura en la celda solar define en que porcentaje aumenta o disminuye la potencia. Es decir, si el coeficiente de temperatura de cualquier celda es de -0,2%, entonces por cada aumento de la unidad de temperatura, la potencia máxima de la celda se reducirá en un 0,2% (Hamzat et al., 2021). El valor real del coeficiente de temperatura, en particular, no depende solo del material de la celda solar sino también de T_{ref} , como se muestra en la Ecuación 16.

$$\beta_{ref} = \frac{1}{T_0 - T_{ref}} \quad (16)$$

Donde T_0 es la temperatura a la que la eficiencia eléctrica del módulo fotovoltaico cae a cero, la cual para las celdas solares de silicio cristalino esta temperatura es de 270 °C (Skoplaki & Palyvos, 2009).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

En la Tabla 3 se muestra los coeficientes de temperatura de algunas de las celdas solares existentes (Kandeal et al., 2020).

Tabla 3

Coefficientes de temperatura

Tipo	Coefficiente de Temperatura %/°C
Monocristalino – Si	-0,4 a -0,5
Policristalino – Si	-0,4 a -0,5
Si amorfo (a-Si)	-0,35 a -0,38
CIGS	-0,32 a -0,36
CdTe	-0,25

Nota. Tomado del artículo “Photovoltaics performance improvement using different cooling methodologies: A state-of-art review”. *Journal of Cleaner Production*, 273, 122772.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122772>

De acuerdo con la tabla anterior, se puede definir que las celdas solares de capa fina (thin Film), se ven menos afectadas que las monocristalinas y policristalinas por el aumento de la temperatura y pueden ser utilizadas en lugares cálidos. Lo anterior se puede sustentar con un experimento realizado por (Adeeb et al., 2019), donde se realizó la instalación de tres sistemas fotovoltaicos (monocristalino, policristalino y de capa fina (a-Si)), sometidos a las mismas condiciones meteorológicas y los resultados obtenidos muestran que el mejor coeficiente de temperatura fue el del panel solar de silicio amorfo (a-Si) con un valor de -0,0984% y para el monocristalino y policristalino -0,109% y -0,124% respectivamente.

Sin embargo, las eficiencias de las celdas solares de silicio son superiores a las de capa fina, entonces así el coeficiente de temperatura sea mayor en las celdas de silicio y afecte la potencia de salida en mayor cantidad por cada °C que aumente la temperatura, se compensa con los valores de eficiencia.

La temperatura juega un papel muy importante en la eficiencia de una celda solar, debido a que cuando aumenta impacta fuertemente la potencia de salida, haciendo que se reduzca $P_{m\acute{a}x}$. De acuerdo con un análisis realizado al modelo de un diodo de una celda solar, el parámetro que se afecta fuertemente con el aumento de la temperatura es la corriente de saturación del diodo I_o , impactando directamente el V_{OC} , dado su relación directa con la potencia, se reduce el rendimiento de la celda solar. El porcentaje de reducción en la eficiencia de una celda solar está definido por el coeficiente de temperatura de cada tipo de celda. Para analizar de una manera adecuada el impacto de la temperatura en la eficiencia de una celda solar se pudo establecer que el modelo más utilizado es el reportado por (Skoplaki & Palyvos, 2009) y que se expresa mediante la Ecuación 15.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

4.2 TECNOLOGÍAS DE REFRIGERACIÓN APLICADAS EN PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS

En el capítulo anterior se observó el impacto de la temperatura sobre el funcionamiento de las celdas solares, dado que cuando aumenta la temperatura la eficiencia de estos elementos comienza a disminuir.

La refrigeración de la superficie operativa es un factor clave que se debe tener en cuenta para lograr una mayor eficiencia cuando las celdas solares están en operación. La refrigeración adecuada puede mejorar la eficiencia eléctrica y disminuir la tasa de degradación de la celda con el tiempo.

El objetivo principal de la tecnología de refrigeración solar fotovoltaica es capturar y convertir el calor generado por los rayos solares en energía utilizable. La mejor manera de lograr esto es mediante el uso de un sistema de refrigeración activo o pasivo. Los sistemas activos necesitan una fuente externa de energía y equipos adicionales, como bombas o ventiladores, para hacer circular el medio refrigerante. Sin embargo, son más efectivos en términos de tasas de transferencia de calor de enfriamiento.

Los sistemas pasivos no requieren equipo mecánico adicional ni una fuente de alimentación externa para impulsar el sistema de refrigeración. Esto conduce a una estructura más simple y menores costos de mantenimiento (Maleki et al., 2020).

En esta sección del trabajo se realizará una descripción de las tecnologías de refrigeración de celdas solares más comunes: las que utilizan como medio refrigerante agua, aire, materiales de cambio de fase (PCM) y nanofluidos, al igual que tubos de calor.

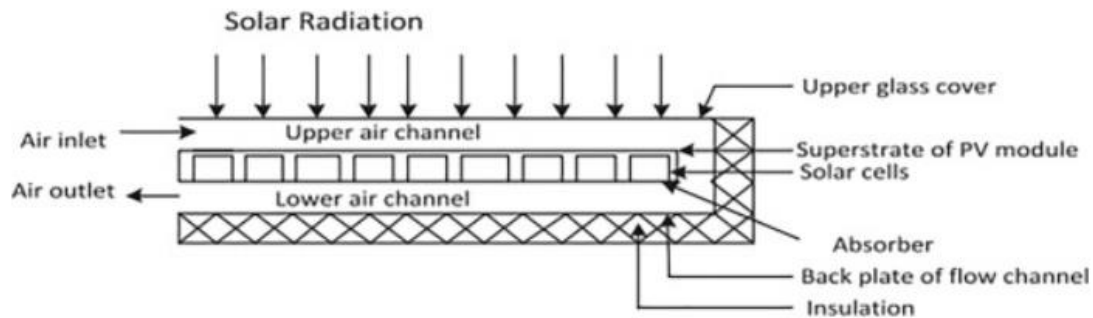
4.2.1 Refrigeración con Aire

La refrigeración por flujo de aire es una de las tecnologías de refrigeración más simples y fácilmente disponibles. Durante este proceso, el aire se usa por convección natural o forzada para eliminar el calor del sistema fotovoltaico/térmico (PVT). Sin embargo, la circulación de aire forzado es un método de enfriamiento activo, que utiliza una cantidad considerable de trabajo de un ventilador (Verma et al., 2020). Se considera una alternativa rentable porque requiere poco o ningún material, pero las malas propiedades termo-físicas del aire son un inconveniente (Hamzat et al., 2021).

Los sistemas de refrigeración por aire se suelen aplicar en diferentes dispositivos con el fin de reducir la temperatura. Aunque el uso de aire como refrigerante no es tan eficiente como los líquidos, existen algunas ventajas en este tipo de enfriamiento, como la utilización mínima de material y el bajo costo operativo (Maleki et al., 2020). En la Figura 23 se muestra el modelo de un sistema de refrigeración con aire.

Figura 23

Módulo fotovoltaico refrigerado por aire



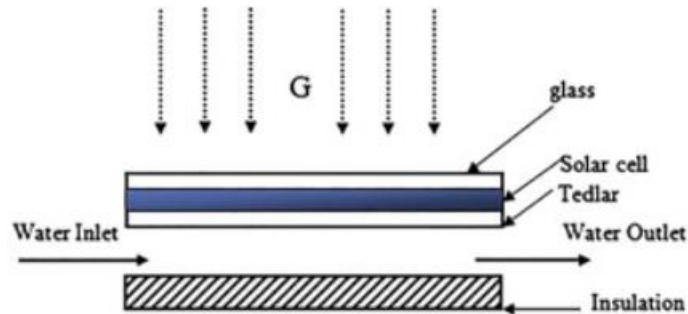
Nota. Tomado del artículo “A review on the approaches employed for cooling PV cells”. *Solar Energy*, 209(June), 170–185. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.083>

4.2.2 Refrigeración con Agua

La disponibilidad de agua y su capacidad de transporte de calor ha hecho posible que se implante para la refrigeración activa de los paneles fotovoltaicos. Sin embargo, el sistema fotovoltaico debe ser resistente a la corrosión y la instalación también debe ser hermética. La aplicación industrial de la tecnología de refrigeración por agua es más costosa que su contraparte de refrigeración por aire, pero posee la capacidad de extraer más calor de las superficies fotovoltaicas (Hamzat et al., 2021). Existen gran variedad de configuraciones para instalar un sistema de refrigeración por agua, en la Figura 24 se muestra un modelo de este sistema.

Figura 24

Refrigeración por agua aplicada a los módulos fotovoltaicos



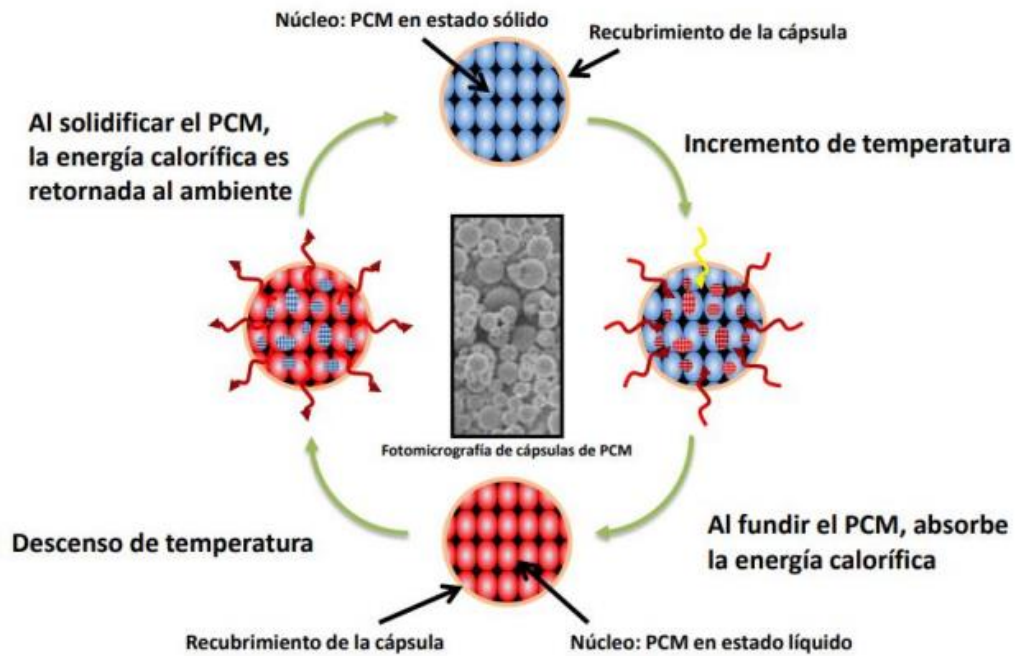
Nota. Tomado del artículo “A review on the approaches employed for cooling PV cells”. *Solar Energy*, 209(June), 170–185. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.083>

4.2.3 Materiales de Cambio de Fase (PCM, por sus siglas en inglés)

Los PCM son sustancias que tienen un alto calor latente de fusión con un punto de fusión adecuado para la aplicación. Los materiales de cambio de fase absorben o ceden calor cuando alcanzan la temperatura de cambio de fase, es decir, cuando pasan de estado sólido a líquido o viceversa. Durante el cambio de fase la temperatura se mantiene constante y el material sigue absorbiendo energía (Energéticos, 2022). Los PCM se utilizan en módulos fotovoltaicos para reducir la temperatura de la celda absorbiendo calor durante la fusión y liberando calor cuando se congela y viceversa. La temperatura de trabajo varía en un rango muy amplio, el cual va de -5 °C a 190 °C. El principal inconveniente de los materiales de cambio de fase es la baja conductividad térmica que se encuentra en el rango de 0,2 a 0,4 (W/mK) (N. K. Sharma et al., 2020). En la Figura 25 se muestra el proceso que experimenta un PCM con los cambios de temperatura.

Figura 25

Esquema de funcionamiento de PCM



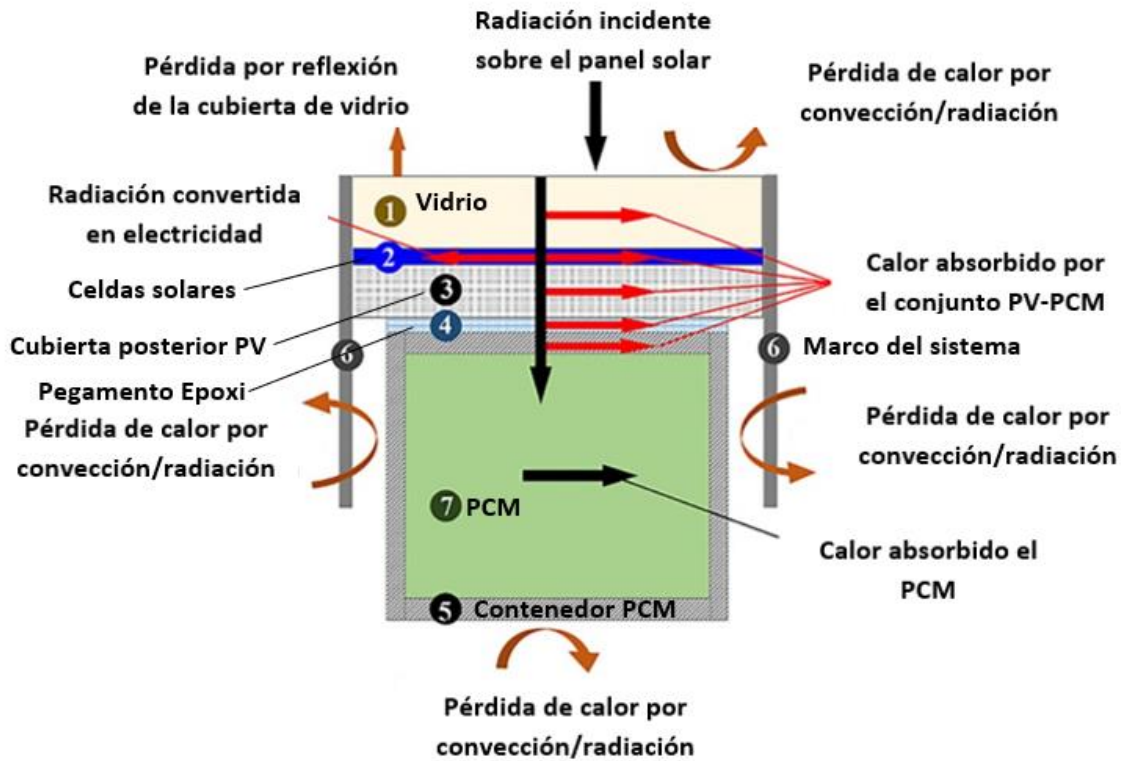
Nota. Tomado de *Almacenamiento térmico con materiales de cambio de fase*. Pág 36 <https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/3325/1/Almacenamiento%20t%C3%A9rmico%20mediante%20PCM%20%28tesis%29.pdf>

Para la extracción de calor de la energía solar fotovoltaica, el PCM debe tener una temperatura de fusión superior a la temperatura ambiente para evitar la fusión antes del aumento de la temperatura en la parte trasera. Debido a todas estas propiedades, los PCM son una muy buena opción para la refrigeración del panel fotovoltaico, ya que absorben la temperatura durante el día y liberan esa entalpía durante la noche (Verma et al., 2020). También se debe tener en cuenta que el punto de fusión del material PCM debe ser superior a la temperatura nocturna más baja para que el PCM derretido pueda congelarse mientras no está funcionando y así completar el ciclo operativo (N. K. Sharma et al., 2020).

En la Figura 26 se muestra un esquema de implementación de PCM para refrigeración de panel fotovoltaico.

Figura 26

Esquema de un sistema PVT con PCM



Nota. Tomado del artículo "A review on the approaches employed for cooling PV cells". *Solar Energy*, 209(June), 170–185. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.083>

Clasificación de los PCM

Los materiales de cambio de fase se clasifican en orgánicos e inorgánicos.

PCM Orgánicos

Los PCM orgánicos son químicamente estables, no son tóxicos, son incoloros y abundantes, y son utilizados para aplicaciones de baja temperatura (Velmurugan & Kumarasamy, 2021). La conductividad térmica de los PCM orgánicos es baja en su estado sólido y varía entre 0,18 a 0,24 W/mK (N. K. Sharma et al., 2020). Entre los materiales orgánicos utilizados como PCM hay que destacar las parafinas (hidrocarburos parafínicos, ceras parafínicas y aleaciones moleculares de fórmula química C_nH_{2n+2} (con $n > 16$), los cuales son mezclas de hidrocarburos saturados (mezcla de

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

alcanos) obtenidos en el refinado del crudo de petróleo. Tienen un calor específico de 2,1 kJ/kg·K y una temperatura de fusión entre 20°C y 80°C, poseen un alto calor de fusión, entre 70 kJ/kg y 250 kJ/kg y gran densidad de energía acumulada, entre 54 kWh/m³ y 71 kWh/m³ (Carrera, 2012).

Las parafinas presentan hasta cuatro o cinco veces mayor capacidad para acumular energía que el agua, para bajos gradientes de temperatura, pero son inflamables, con un punto de ignición que se encuentra por encima de los 250°C (Carrera, 2012). La densidad de este material en estado líquido es de 750 kg/m³ y en estado sólido 850 kg/m³ (N. K. Sharma et al., 2020).

Los PCM orgánicos poseen buena estabilidad térmica dado que las parafinas no pierden sus propiedades al estar sometidas a múltiples ciclos de carga y descarga térmica, esto se debe a que no existen reacciones químicas durante el proceso de almacenamiento de calor en la parafina ni con el material que la contiene. Por otro lado, los problemas de corrosión son prácticamente inexistentes, debido a su poca afinidad química con otros materiales. Las parafinas no son tóxicas para animales o plantas, no contaminan el agua y son 100% reciclables. Estas sustancias tienen un alto costo, por ellos se suelen utilizar mezclas de parafinas y no parafinas puras (Carrera, 2012).

PCM Inorgánicos

Entre el grupo de los PCM inorgánicos se encuentran hidratos de sal, las sales, los metales y aleaciones. Poseen alto calor latente, no son inflamables y están disponibles a precios más económicos (N. K. Sharma et al., 2020).

Para aplicaciones de temperatura de funcionamiento baja y media, se prefieren los PCM con una temperatura de fusión baja, por lo que los PCM inorgánicos basados en hidratos de sal se usan ampliamente en comparación con los metálicos. Estos hidratos de sal inorgánica contienen tienen un alto calor latente de fusión, por lo que la cantidad de PCM requerida para almacenar energía térmica más alta se reduce considerablemente. Además, tienen mayor densidad y conductividad térmica en comparación con las de los compuestos orgánicos, lo que hace que se proyecte estos materiales como una opción atractiva (Velmurugan & Kumarasamy, 2021).

Los hidratos de sal son una alternativa a los compuestos orgánicos debido a su conductividad y reducción de la barrera de conducción térmica durante el proceso de carga y descarga. Sin embargo, la sedimentación del contenido de sal y la inestabilidad química plantean un problema grave que altera la temperatura de fusión y el calor latente de fusión (Velmurugan & Kumarasamy, 2021).

Los hidratos de sal explorados extensamente en el enfriamiento de módulos fotovoltaicos son Na₂HPO₄·12H₂O, Na₂SO₄·10H₂O y el cloruro de calcio hexahidratado, pero debido a su corrosividad,

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

dificultad de solidificación y baja temperatura de fusión, presentan grandes desafíos y hace que se limite el uso en el enfriamiento de módulos fotovoltaicos (Velmurugan & Kumarasamy, 2021).

Eutécticos

Una mezcla eutéctica es una combinación de dos materiales: orgánico-orgánico o inorgánico-inorgánico u orgánico-inorgánico (N. K. Sharma et al., 2020). Estos PCM compuestos no suelen estar disponibles comercialmente y son más caros que la cera de parafina. Sin embargo, considerando su flexibilidad de composición para obtener la temperatura de fusión requerida y una buena estabilidad térmica incluso después de varios miles de ciclos térmicos, representan gran potencial para la refrigeración de los módulos fotovoltaicos. En particular, estos sistemas son ventajosos cuando se integran para una planta de energía de varios MW, ya que la compra al por mayor reduciría el costo de inversión (Velmurugan & Kumarasamy, 2021).

Factores que afectan el rendimiento de los PCM

Según (N. K. Sharma et al., 2020), hay varios factores que afectan el rendimiento de los PCM, entre ellos se encuentra la densidad de estado sólido, la conductividad térmica, el calor latente y la temperatura el punto de fusión, entre otros. A continuación, se detallan algunos de estos factores.

Conductividad térmica: la transferencia de calor por PCM se ve muy afectada por este factor, dado que el rendimiento del PCM aumenta con el aumento de su conductividad térmica.

Calor latente: Es la cantidad de calor necesaria para cambiar la fase de una sustancia. Los PCM con mayor calor latente producen un mejor rendimiento.

Temperatura del punto de fusión: Esta es la temperatura a la que una sustancia se convierte de estado sólido a líquido. Un PCM ofrece un rendimiento óptimo cuando su punto de fusión está por arriba de la temperatura ambiente alrededor de 5 °C.

Limitaciones de la refrigeración PCM

La capacidad de absorción de calor del material se deteriora con el tiempo. Los PCM no ofrecen el mismo rendimiento en condiciones climáticas cálidas y frías. La masa aproximada de PCM requerida es de 2,6 kg/m² para reducir la temperatura en 1 °C, lo que hace que el sistema PV-PCM sea más pesado. Esta tecnología es muy costosa y el periodo de amortización es muy alto (N. K. Sharma et al., 2020).

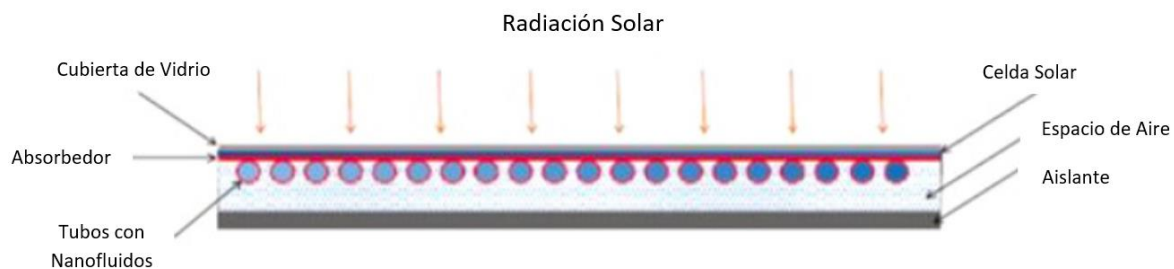
	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

4.2.4 Nanofluidos

Se definen como una mezcla de nanopartículas de un diámetro que oscila entre 1 nm y 100 nm, dispersas eficientemente en un fluido base que puede ser agua, aceite térmico, etilenglicol, entre otros. Las propiedades de los nanofluidos, como la viscosidad, la conductividad térmica, el coeficiente de transferencia de calor, el calor específico y la capacidad calorífica, juegan un papel muy importante para mejorar el rendimiento del sistema. Los nanofluidos con alta conductividad térmica mejoran la tasa de transferencia de calor y, en última instancia, la eficiencia general del sistema (Gupta & Pradhan, 2021). En la Figura 27 se muestra un sistema típico utilizando nanofluidos como medio de refrigeración, donde se hace que el nanofluido fluya por debajo del módulo fotovoltaico para la absorción de calor por convección y la reducción de la temperatura.

Figura 27

Refrigeración por nanofluidos aplicado a módulos fotovoltaicos



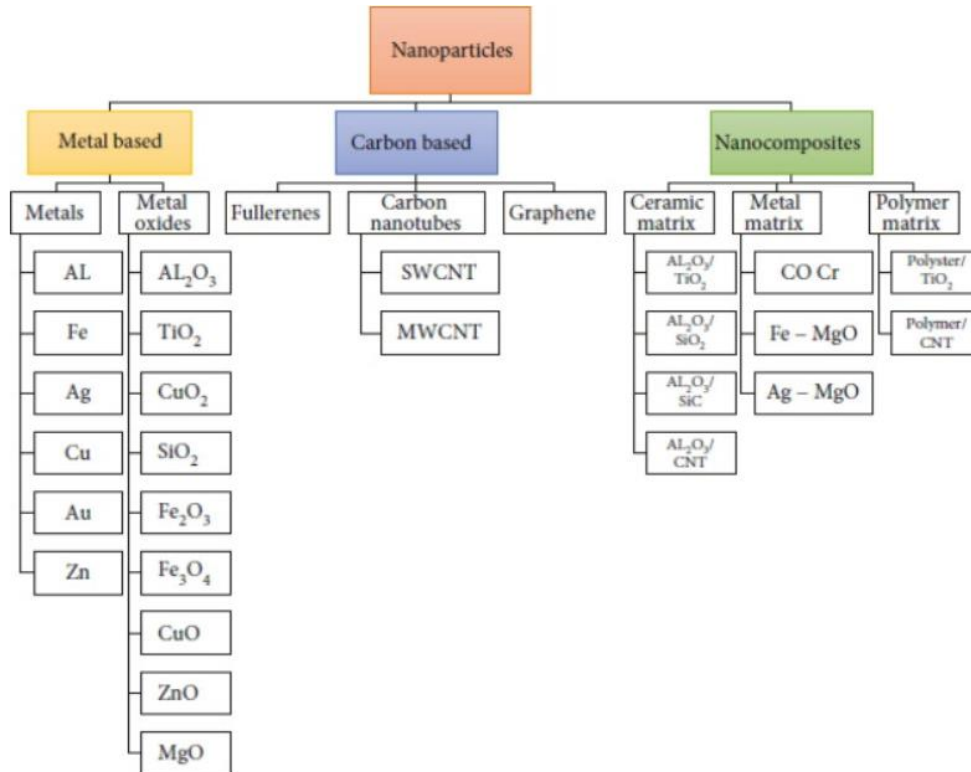
Nota. Tomado del artículo “A review of recent advances and the role of nanofluid in solar photovoltaic thermal (PV / T) system”. *Materials Today: Proceedings*, 44, 782–791.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.708>

Las nanopartículas se clasifican en tres categorías, las que son basadas en metales, las basadas en carbonos y los nanocompuestos, como se muestra en la Figura 28. Entre estos tres, los nanocompuestos mejoran las propiedades termo físicas del fluido base ya que tienen una alta conductividad térmica y capacidad de transporte de calor. Debido a las propiedades termo físicas mejoradas, la propiedad general del sistema mejora, lo que da como resultado la disminución del costo operativo del sistema (Gupta & Pradhan, 2021).

Figura 28

Clasificación de las nanopartículas



Nota. Tomado del artículo “A review of recent advances and the role of nanofluid in solar photovoltaic thermal (PV / T) system”. *Materials Today: Proceedings*, 44, 782–791.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.708>

Los factores considerados para elegir el fluido base son la viscosidad, la capacidad calorífica, la estabilidad térmica, el punto de congelación y el de ebullición. Además, el fluido base seleccionado no debe reaccionar ni causar la degradación de las nanopartículas, debe ser seguro y no corrosivo, y tener una baja viscosidad para evitar el incremento de los costos de bombeo en el sistema de refrigeración (Tembhare et al., 2022).

Una de las principales características del nanofluido es su estabilidad, lo que lo diferencia de otro tipo de mezclas. El tamaño nanométrico de las partículas dispersas las ayuda a mantenerse a flote contra la fuerza de la gravedad sin asentarse en el fondo. Aun así, las diversas fuerzas que actúan sobre ellos los hacen susceptibles a que se aglomeren, lo que puede conducir a la sedimentación y reducen el rendimiento del sistema. Sin embargo, esto se puede evitar mediante la adición de ciertos agentes, comúnmente conocidos como dispersantes o tensioactivos, que pueden evitar su

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

aglomeración. El tensioactivo se adhiere a la superficie de las nanopartículas, evitando así su tendencia a adherirse a cualquier otra superficie, pero la alta concentración de tensioactivos también puede reducir la conductividad térmica debido a la alteración de la estructura del fluido (Tembhare et al., 2022).

De acuerdo con (Gupta & Pradhan, 2021) a continuación, se presentan algunas ventajas y desventajas de los nanofluidos.

Ventajas de los nanofluidos

- La capacidad calorífica y la capacidad de absorción son muy altas en comparación con otros fluidos tradicionales.
- La tasa de transferencia de calor es más alta en comparación con el fluido base, debido a su alta conductividad térmica.
- Los nanofluidos tienen una alta densidad y transferencia de calor por convección debido a lo cual aumenta la eficiencia del sistema.
- La temperatura del absorbedor se reduce mediante el uso de nanofluidos y, por lo tanto, protege el material.

Desventajas de los nanofluidos

- El costo de producción y el costo de preparación de los nanofluidos son muy altos en comparación con otros fluidos.
- El uso de nanofluidos aumenta el trabajo de la bomba y la caída de presión, lo que resulta en un alto costo operativo del sistema.
- Comportamiento inestable de los nanofluidos debido a la aglomeración de nanopartículas que reduce el rendimiento del sistema.
- El problema de la erosión y la corrosión puede ocurrir con el uso de nanopartículas.
- El proceso de producción de nanofluidos es muy difícil.

4.2.5 Refrigeración por Tubos de Calor (heat pipe)

Los tubos de calor son dispositivos de funcionamiento pasivo, tienen una gran conductancia térmica y son muy efectivos en el transporte de calor a grandes distancias presentando una caída de temperatura muy baja (Rojas, 2012). Este elemento consta de tres partes, un evaporador, una sección de transferencia adiabática y un condensador con fluido de trabajo en el interior. (Verma et al., 2020).

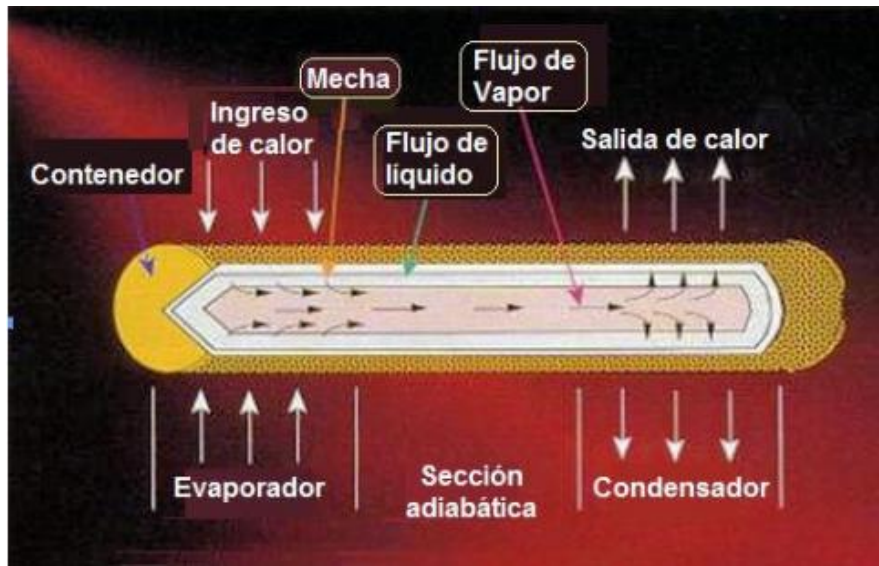
Los tubos de calor son utilizados principalmente en la refrigeración electrónica. Para esta aplicación consisten en un tubo de metal hueco con una mecha porosa en la superficie interior como se muestra en la Figura 29. En un tubo de calor, el líquido de trabajo llena el interior del tubo, el cual

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

transfiere calor continuamente a través de un ciclo producido por evaporación en la sección de calentamiento y condensación en la sección de enfriamiento (S. Kumar et al., 2022).

Figura 29

Diagrama esquemático de un tubo de calor



Nota. Tomado de “Desarrollo Histórico de los Tubos de Calor y sus Aplicaciones”. *Contribuciones Científicas y Tecnológicas*, 50–59.

Un tubo de calor puede tener múltiples fuentes o sumideros de calor, con o sin secciones adiabáticas, dependiendo de su aplicación y diseño específico. El calor aplicado a la sección del evaporador por una fuente externa es conducido a través de la pared del contenedor y de la estructura porosa, donde éste vaporiza al fluido de trabajo. La presión de vapor resultante conduce el vapor a través de la sección adiabática hacia el condensador, donde el vapor se condensa liberando su calor latente. La presión capilar creada por la curvatura de la superficie del fluido (menisco) en la mecha, bombea el fluido condensado de vuelta a la sección del evaporador. Por lo tanto, el tubo de calor puede transportar continuamente el calor latente desde la sección del evaporador hacia la sección del condensador. Este proceso se desarrolla continuamente mientras exista suficiente presión capilar para conducir el condensado de vuelta al evaporador (Rojas, 2012).

El vapor fluye a gran velocidad hacia el condensador donde se condensa cediendo su calor latente. El fluido condensado regresa al evaporador ya sea por la influencia de la gravedad, los efectos de la capilaridad o fuerzas externas, dependiendo de la configuración de la tubería de calor. El material de la carcasa o cubierta del tubo de calor es fundamental, debido a que debe conducir el calor de

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

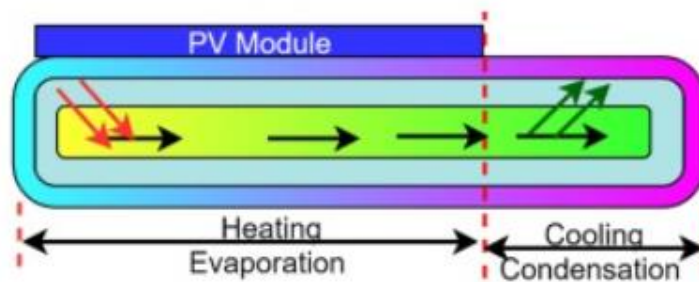
una manera efectiva al fluido de trabajo y proporcionar la rigidez estructural requerida mientras se mantienen las condiciones de vacío al interior. Los metales, la cerámica y el vidrio son los materiales más utilizados. Entre los metales se utiliza el cobre, aluminio y acero inoxidable. Se debe tener en cuenta al elegir el material de la carcasa, el cual debe ser compatible con el fluido de trabajo, por ejemplo, las carcasas de acero al carbono cuando se utiliza agua como fluido de trabajo, limita el rendimiento operativo debido a la generación de hidrógeno (Senthil et al., 2021).

Algunos fenómenos que limitan el rendimiento térmico de los tubos de calor, **la capilaridad o límite de absorción**, ocurre cuando el condensado no puede regresar al evaporador debido a una fuerza de bombeo o fuerza capilar insuficientes, **el límite de arrastre**, que tiene lugar cuando la velocidad del vapor es muy alta y empuja el condensado en el flujo de vapor, **el límite de ebullición**, que ocurre cuando se forman burbujas de vapor dentro la estructura de la mecha por la cual se conduce el fluido de trabajo (Senthil et al., 2021).

Para la refrigeración en sistemas PVT, los módulos fotovoltaicos se conectan donde está ubicado el evaporador como se muestra en la Figura 30, quiere decir por donde ingresa el calor al tubo de calor.

Figura 30

Diagrama esquemático de refrigeración de un módulo fotovoltaico por tubo de calor



Nota. Tomado del artículo “A detailed review on the performance of photovoltaic / thermal system using various cooling methods”. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 51(August 2021), 101844. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101844>

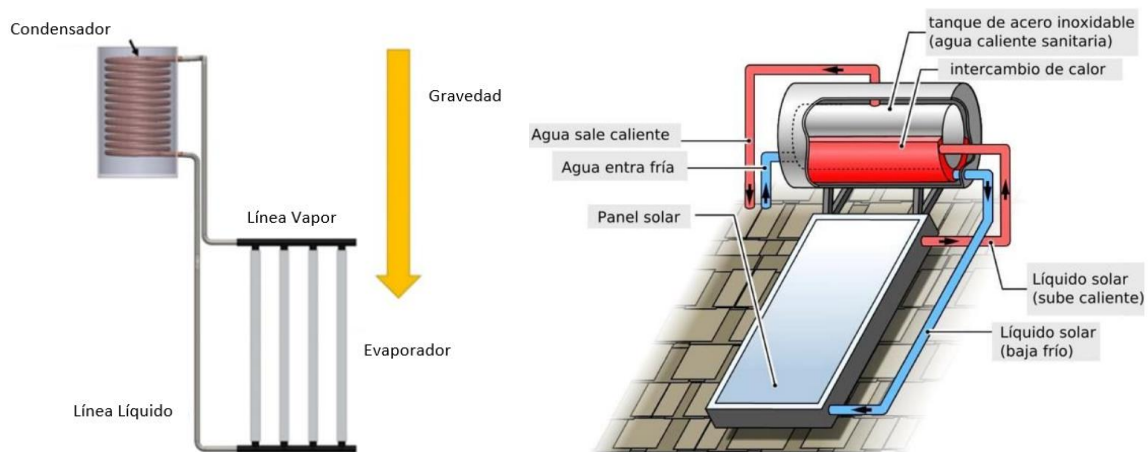
Tipos de tubos de calor

Termosifón cerrado de dos fases: Es un tubo de calor, en el cual el condensador está por encima del evaporador, de tal manera que el condensado es retornado al evaporador por efecto de la gravedad, tal como se muestra en la Figura 31. La operación de un termosifón es sensible al volumen

de carga del fluido de trabajo. Para termosifones sin mecha, ha sido demostrado experimentalmente que la tasa máxima de transferencia de calor se incrementa con la cantidad de fluido de trabajo (Rojas, 2012). Para la refrigeración de un panel solar fotovoltaico este sistema utiliza agua de la red que ingresa a un tanque en el cual se acumula, el agua que hace la función de refrigerar el panel se calienta y puede ser utilizada en las aplicaciones que se requiera.

Figura 31

Diseño esquemático de termosifón de circuito cerrado de dos fases



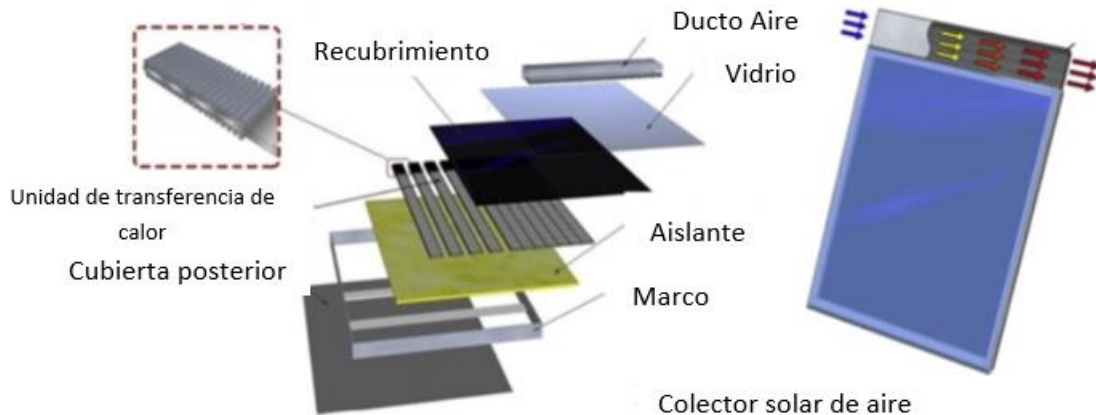
Nota. Tomado del artículo “A holistic review on the integration of heat pipes in solar thermal and photovoltaic systems”. *Solar Energy*, 227(September), 577–605.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.09.036>

Microtubos de calor: Son sistemas de transferencia de calor de dos fases alimentados por fuerzas capilares que utilizan micromechas o microcanales para inducir la fuerza de bombeo requerida. El rendimiento térmico se rige por la tasa de circulación del fluido. La tasa de transferencia de calor se puede controlar modificando la longitud de la tubería y el ángulo. En la Figura 32 se muestra una ilustración para la aplicación de colectores solares de aire (Senthil et al., 2021). Si el condensador está por encima del evaporador no es necesaria la mecha en la sección del evaporador, dado que el condensado cae por efecto de la gravedad de nuevo al evaporador (Rojas, 2012).

Figura 32

Estructura de un colector solar con microtubos de calor



Nota. Tomado del artículo “A holistic review on the integration of heat pipes in solar thermal and photovoltaic systems”. *Solar Energy*, 227(September), 577–605.

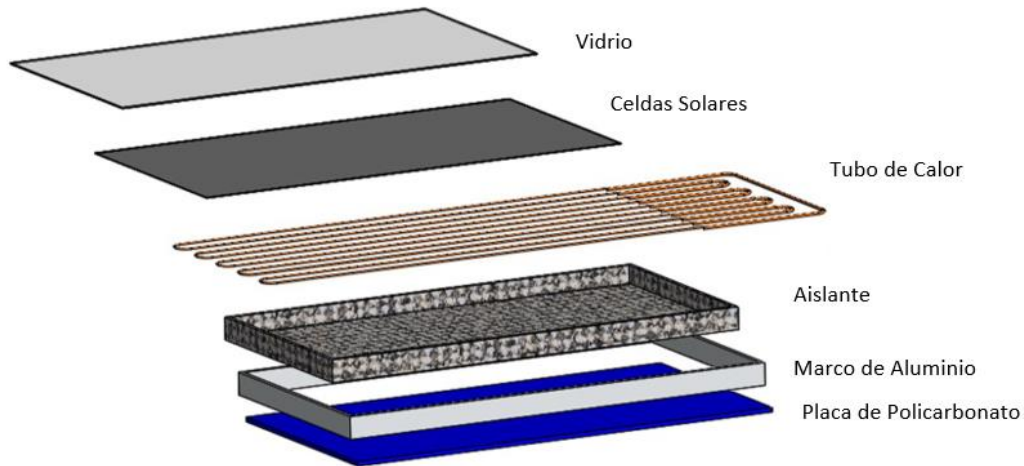
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.09.036>

Tubo de calor pulsante: Son tubos capilares sin mecha en circuito cerrado o circuito abierto. La diferencia de presión de saturación entre el evaporador y el condensador aumenta la tasa de transferencia de calor. Es de construcción simple, económico y más flexible que los otros tubos de calor. Se utiliza en sistemas de recuperación de calor, refrigeración electrónica, entre otras aplicaciones. La Figura 33 muestra el esquema de refrigeración por tubo de calor pulsante de circuito cerrado con una configuración de doble diámetro, donde el diámetro mayor va en el extremo del condensador y el diámetro menor en el lado del evaporador (Senthil et al., 2021). En un sistema de refrigeración fotovoltaica utilizando tubo de calor pulsante la parte del condensador queda por fuera del área que cubre el panel (Aref et al., 2021).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Figura 33

Esquema de refrigeración por tubo de calor pulsante de circuito cerrado y doble diámetro



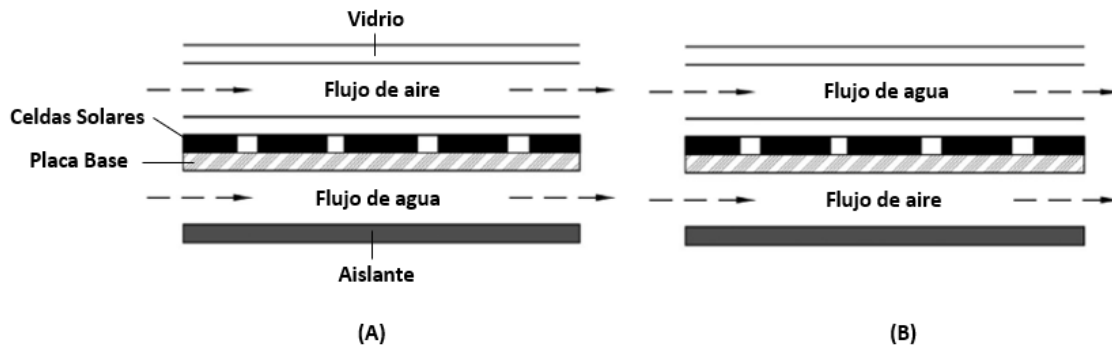
Nota. Tomado del artículo A novel dual-diameter closed-loop pulsating heat pipe for a flat plate solar collector. *Energy*, 230, 120751. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120751>

4.2.6 Refrigeración Agua/Aire

Este tipo de tecnología utiliza los fluidos de agua y aire simultáneamente para la refrigeración del módulo. La distribución básica de este tipo de sistemas es que por encima de las celdas solares va un fluido y en el lado posterior pasa el otro fluido, las combinaciones posibles de estos sistemas es (A) aire/agua o (B) agua/aire como se muestra en la Figura 34 (Sathe & Dhoble, 2017).

Figura 34

Configuración de sistemas de refrigeración agua-aire



Nota. Tomado del artículo “A review on recent advancements in photovoltaic thermal techniques”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76(October 2016), 645–672. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.075>

En conclusión, las diferentes tecnologías de refrigeración tienen como fin enfriar el módulo fotovoltaico para bajar la temperatura de operación, mejorar la eficiencia eléctrica y la potencia entregada por el sistema fotovoltaico. En esta sección del trabajo se describió de una manera muy general las tecnologías de refrigeración más comunes, las cuales son agua, aire, agua/aire, materiales de cambio de fase (PCM por sus siglas en inglés), nanofluidos y tubos de calor.

Las tecnologías de refrigeración por agua y aire son las más sencillas y pueden ser activos o pasivos, los sistemas activos son los que requieren equipos adicionales para mover el fluido y los sistemas pasivos no requieren equipo mecánico adicional ni una fuente de alimentación externa para impulsar el sistema de refrigeración. Los nanofluidos tienen una conductividad térmica más alta que la de los fluidos base, sin embargo, es una tecnología muy costosa. Los PCM es una tecnología pasiva de refrigeración, se utilizan resinas o sales hidratadas, no obstante, para reducir la temperatura del módulo solar en 1°C es necesario 2,6 kg/m², lo que hace que el sistema quede muy pesado, además el periodo de amortización es muy alto. La tecnología de refrigeración utilizando tubos de calor puede presentar algunos fenómenos que limitan el rendimiento térmico, los cuales son la capilaridad o límite de absorción, el límite de arrastre y el límite de ebullición.

4.3 IMPACTO DE LA REFRIGERACIÓN EN LA EFICIENCIA DE LOS PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS

En la sección anterior se realizó una descripción muy general de las tecnologías de refrigeración más comunes. En esta sección del trabajo se pretende mostrar los resultados que se han obtenido en investigaciones y experimentos reportados en la literatura utilizando las tecnologías de refrigeración mencionadas anteriormente.

En la Tabla 4 se presenta un resumen de los hallazgos más importantes que se han encontrado en los últimos años al aplicar distintas tecnologías de refrigeración en paneles fotovoltaicos.

Tabla 4

Revisión del comportamiento de la eficiencia en los módulos solares fotovoltaicos utilizando las diferentes tecnologías de refrigeración.

Tipo Refrigeración	Descripción	Resultados	Referencia
Agua	Experimento realizado en una ciudad de Irak, se colocaron 4 paneles solares monocristalinos de 150W cada uno, se dejó uno sin refrigeración, y los otros 3 se refrigeraron con agua, dejando correr sobre la superficie flujos de 3 l/h, 6 l/h y 9 l/h.	Se pudo evidenciar una mejora en la eficiencia del 8,3% en el panel refrigerado con el flujo de 3 l/h, dado que, a menor caudal, menor es la velocidad del fluido, entonces el tiempo de transferencia de calor entre el fluido y el módulo fotovoltaico es mayor.	(Ahmed & Hassan Danook, 2018)
Agua	Se realiza un experimento en el cual se colocan dos paneles solares policristalinos de 17W cada uno. A uno de ellos se instala un sistema automático de refrigeración activo	Se realiza la comparación de las potencias generadas por cada uno de los paneles solares, encontrando que el que genera más potencia es el refrigerado, arrojando	(Laseinde & Ramere, 2021)

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Tipo Refrigeración	Descripción	Resultados	Referencia
	de aspersión de agua sobre la superficie del módulo, el cual activa el sistema cuando la temperatura del panel supera los 40°C y rocía agua sobre la superficie a una tasa de 80 ml/s.	como resultado un aumento en la eficiencia de 16,65%.	
Agua	El experimento se realiza con dos paneles de silicio policristalino de 10W, uno sin refrigeración y el otro con refrigeración. Se instala una placa de cobre en la parte posterior del panel y tubos de cobre por los que va a circular agua a 0,0166 kg/s. Se utiliza una bomba para hacer que circule el agua por los tubos.	El incremento máximo de la eficiencia fue de 6,08%.	(Singh et al., 2020)
Agua	Se realiza la instalación en Tailandia para refrigerar 20 paneles (6kW) con agua por aspersión en la superficie, se requiere de una bomba de 1HP que extrae el fluido de un lago. Este sistema funciona por periodos de 15 minutos y se mantiene en operación por 2 minutos. El sistema opera de 10:30 a 15:30.	La temperatura inicial era aproximadamente 36 °C y se reduce a 16 °C, la potencia aumenta 420W en todo el sistema. La bomba consume 0,26 kWh, por lo tanto, se obtiene 1,21 kWh adicionales con esta tecnología de refrigeración. En este artículo se realizó una evaluación económica donde se indica que esta tecnología es más barata que la de aire y agua/aire y la recuperación de la	(Sasidharan et al., 2018)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Tipo Refrigeración	Descripción	Resultados	Referencia
		inversión se da en 5,12 años.	
Aire	Se realiza la instalación en Tailandia para refrigerar 20 paneles (6kW) con aire por la parte posterior, se instalaron dos ventiladores en serie de 500W cada uno. Este sistema funciona por periodos de 15 minutos y se mantiene en operación por 2 minutos. El sistema opera de 10:30 horas a 15:30 horas.	La temperatura inicial era aproximadamente 36 °C y se reduce a 18 °C, la potencia aumenta 320W en todo el sistema. Los ventiladores consumen 0,7 kWh, por lo tanto, se obtiene 0,42 kWh adicionales con esta tecnología de refrigeración. En este artículo se realizó una evaluación económica donde se indica que esta tecnología es más cara que la de agua, pero más barata que la de agua/aire y la recuperación de la inversión se da en 19,6 años.	(Sasidharan et al., 2018)
Agua - Aire	Se realiza la instalación en Tailandia para refrigerar 20 paneles (6kW) con aire por la parte posterior y agua en la superficie por aspersion, se instalaron dos ventiladores de 500W cada uno en serie y una bomba de 1HP. Este sistema funciona por periodos de 15 minutos y se mantiene en operación por 2 minutos. El sistema opera de 10:30 horas a 15:30 horas.	La temperatura inicial era aproximadamente 36 °C y se reduce a 15 °C, la potencia aumenta 500W en todo el sistema. La bomba y los ventiladores consumen 0,48 kWh, por lo tanto, se obtiene 1,27 kWh adicionales con esta tecnología de refrigeración. En este artículo se realizó una evaluación económica donde se indica que esta tecnología es más cara que la de agua y aire y la recuperación	(Sasidharan et al., 2018)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Tipo Refrigeración	Descripción	Resultados	Referencia
		de la inversión se da en 11,38 años.	
Aire	Un módulo fotovoltaico de silicio monocristalino conformado por 36 celdas es refrigerado por aire con un ventilador, el cual es alimentado desde el mismo módulo y con tasas de flujo de aire entre 0 g/s y 20 g/s. El módulo sin refrigeración con una radiación de 1000W/m ² alcanza una temperatura en la superficie de 102,03 °C y una eficiencia de 4,55%.	<p>de la inversión se da en 11,38 años.</p> <p>Cuando activan el sistema de refrigeración por medio del ventilador, se puede establecer que la tasa de flujo óptima es de 7,5 g/s, reduciendo la temperatura a 63,85 °C y aumentando la eficiencia en un 30,55%, se pasa de un valor de eficiencia de 4,55% a 5,94%. También realizaron la evaluación con una radiación de 2000 W/m² y la eficiencia aumentó 71,43% pasando de un valor de eficiencia de 4,55% a 7,8%.</p>	(Nebballi et al., 2016)
Agua	Experimento consta de dos paneles solares de 30W cada uno, con el fin de evaluar el impacto de la refrigeración por agua en uno de ellos, respecto al otro. Por la superficie del panel solar fluye agua y en la parte posterior del panel se instala una mecha de algodón, la cual absorbe agua y enfría el panel. El panel no refrigerado llegó a una temperatura de 59,27 °C y una eficiencia de 12,83%.	El panel fotovoltaico refrigerado llegó a una temperatura de 35,72 °C, reduciendo la temperatura en 23,55 °C respecto al panel no refrigerado y aumentó la eficiencia un 11,9%, pasando de 12,83% a 14,36%.	(Bonah et al., 2021)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Tipo Refrigeración	Descripción	Resultados	Referencia
Agua	Se instaló un panel fotovoltaico de 50W y un sistema de refrigeración por aspersión de agua sobre la superficie del panel. El experimento se realizó con tres valores de irradiancia 700 W/m ² , 800 W/m ² y 900 W/m ² .	Para 900 W/m ² la eficiencia mejoró 39,7% y asciende a 13,03%. Para 800 W/m ² la eficiencia mejoró 41,46% y asciende a 12,2%. Para 700 W/m ² la eficiencia mejoró 40,86% y asciende a 11,4%	(Yesildal et al., 2022)
PCM	Experimentalmente se utiliza un panel fotovoltaico de silicio de 5W, se utiliza PCM orgánico OM-29, el cual se instaló en la parte posterior del panel con un espesor de 0,03m. El procedimiento se llevó a cabo en la India por dos días.	La temperatura máxima del panel fotovoltaico fue de 59 °C, con el PCM se redujo en promedio 10,35 °C y mejoró la eficiencia del módulo en un 6,4% pasando de 14,55% a 15,48%.	(Rajvikram et al., 2019)
PCM	Experimento realizado en una ciudad de Croacia con tres paneles fotovoltaico de silicio policristalino de 20W, el primero sin refrigeración, el segundo con un solo contenedor de aluminio relleno de PCM en la parte posterior y el tercero con 8 contenedores de aluminio rellenos de PCM. El PCM utilizado fue RT ₂₈ HC. Para el panel con un solo contenedor se utilizó 1,38 kg de PCM y para el de varios contenedores 0,73 kg.	La temperatura máxima de trabajo registrada fue de 55 °C. Aunque en algunos periodos el panel con un único contenedor presentó mejor rendimiento, el mejor rendimiento global lo mostró el panel solar con los 8 compartimientos, aumentando la eficiencia en un 10,7%, respecto al 2,5% del panel con contenedor único.	(Ni, 2021)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Tipo Refrigeración	Descripción	Resultados	Referencia
PCM	El experimento fue realizado en una ciudad de Gracia utilizando un panel fotovoltaico de silicio amorfo (a-Si) de 130 W. El PCM utilizado para el experimento fue RT27, el cual es a base de parafina. Para analizar el efecto de la refrigeración se instalaron dos paneles, uno con refrigeración PCM y otro sin refrigeración. El periodo de análisis fue de julio de 2016 a junio de 2017.	No se tiene un dato exacto de la temperatura de operación del panel, debido a que se menciona promedios, sin embargo, mencionan datos de días significativos, por ejemplo, en un día de análisis entre las 11:30 horas y las 13:30 horas la temperatura del panel sin refrigeración alcanzó un valor de 63,7 °C, mientras que el panel refrigerado con PCM 44,5 °C. La evaluación de la eficiencia se realizó el 11 de mayo de 2017. Se evidenció que la eficiencia aumentó 5,5%, pasó de 8,48% a 8,94%.	(Savvakis & Tsoutsos, 2021)
PCM	Experimento realizado en Barranquilla, Colombia, se utilizó dos módulos policristalinos de 310W cada uno, a uno de ellos se le instaló la refrigeración PCM utilizando cera de parafina RT35.	La temperatura máxima en la superficie de operación fue de 68 °C para el módulo sin refrigeración y para el módulo refrigerado con PCM 52 °C, lo que equivale a una diferencia de 17 °C. La eficiencia promedio diaria tuvo un incremento de 7,8%, pasando de 13,12% a 14,14%.	(Carmona et al., 2021)
PCM	El experimento se realizó instalando dos módulos fotovoltaicos policristalinos de	La temperatura más elevada en el panel sin refrigeración fue de 55 °C y una eficiencia	(K. S. Kumar et al., 2021)

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Tipo Refrigeración	Descripción	Resultados	Referencia
	12W, se instaló uno sin refrigeración y el otro con refrigeración PCM compuesto por cera de parafina (70%) combinado con cobre (20%) y carburo de silicio (10%). La medición se realizó el 21 de febrero de 2020.	de 10,3%. En el panel refrigerado la temperatura más elevada fue de 48,6 °C y una eficiencia de 12,9%. Un aumento porcentual en la eficiencia del 25,3%.	
Agua	El experimento se realizó en una ciudad de Irak, utilizando dos paneles solares policristalinos de 320W. Uno de ellos refrigerado por agua sobre la superficie del panel con un caudal de 3 litros/minuto.	La temperatura máxima del panel sin refrigeración fue 57,5 °C y la temperatura del panel refrigerado 36,5 °C. Como resultado se obtiene que la eficiencia pasó 14,2% a 17% con un aumento del 19,71%.	(Zubeer & Ali, 2022)
Aire	Experimento realizado en Egipto, se utilizaron dos módulos fotovoltaicos policristalinos de 250W. Uno de ellos con refrigeración por aire por la parte posterior del panel. Para enfriar un poco el aire que ingresa al módulo fotovoltaico, fue enterrado con una profundidad de 2m.	La temperatura del panel sin refrigeración fue 55 °C y para el panel con refrigeración fue 42 °C, aumento en la eficiencia 22,98% con un caudal de aire de 0,0288 m ³ /s.	(Elminshawy et al., 2019)
Agua - Aire	Experimento realizado en Argelia, se utilizaron dos paneles fotovoltaicos de 90W. Uno de ellos con refrigeración con agua sobre la superficie y con aire por la parte posterior.	El aumento de la eficiencia fue de 5,7%, respecto al panel sin refrigeración.	(Lebbi et al., 2021)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Tipo Refrigeración	Descripción	Resultados	Referencia
Nanofluidos	Experimento realizado en una universidad de Malasia con dos módulos fotovoltaicos de 400W. Uno de ellos con refrigeración con agua y el otro con nanofluido Al_2O_3 con agua como fluido base.	La temperatura del módulo refrigerado con agua fue de 75 °C, mientras que la temperatura del módulo refrigerado con el nanofluido fue de 42 °C. La eficiencia del módulo refrigerado por agua fue de 9,1% y la del módulo refrigerado con el nanofluido fue 12,1%. El aumento de la eficiencia fue de 32,9%.	(Hussien et al., 2014)
Nanofluidos	Experimento realizado en Irán, se utilizaron módulos fotovoltaicos policristalinos de 250W, se evaluaron 3 nanofluidos Al_2O_3 , TiO_2 y ZnO , respecto a otro módulo sin refrigeración.	El nanofluido con mejor rendimiento es ZnO debido a que la eficiencia fue 14,65%, un 8,19% mayor que la del módulo sin refrigeración que fue de 13,54%	(Sohani et al., 2021)
Nanofluidos	Experimento realizado en Turquía, se utilizaron 2 paneles de silicio policristalino de 20W. El nanofluido utilizado fue Al_2O_3 con agua como fluido base a un caudal másico 0,0067 kg/s, circulando por tubería de cobre en la parte posterior del panel.	La temperatura máxima en el módulo sin refrigeración fue de 52,6 °C y en el módulo refrigerado fue 36 °C. El aumento en la eficiencia del módulo refrigerado fue 40,5% pasando de 4,78% a 6,72%.	(Jasim et al., 2022)
PCM	Se utilizaron paneles de silicio de 50 W, a uno de ellos se instaló PCM a base de parafina RT20 en la parte posterior.	Se logró demostrar que el panel refrigerado con PCM aumentó la eficiencia un 7,95%.	(R. Sharma et al., 2021)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

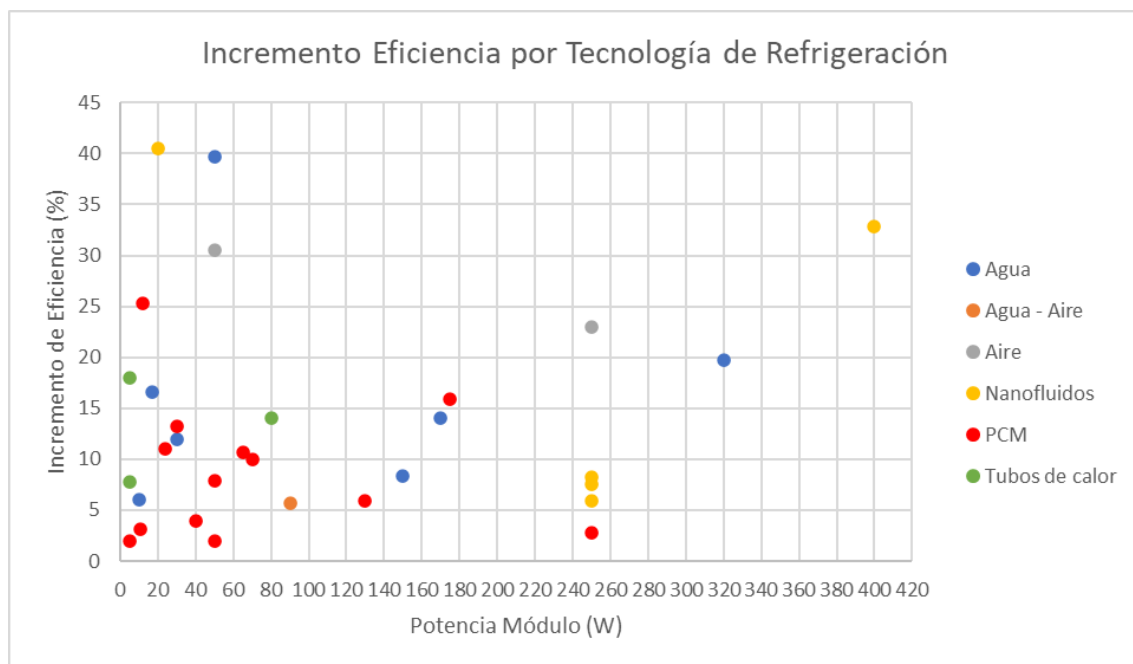
Tipo Refrigeración	Descripción	Resultados	Referencia
Agua	Se utilizaron paneles de 170 W, uno de ellos refrigerado con agua sobre la superficie con un sistema de automatización que consiste en un microcontrolador arduino, un relé y una fuente de alimentación conectada desde el módulo y colocado detrás del panel para protegerlo del medio ambiente.	La temperatura del panel se redujo de 34,7 °C a 32,6 °C. La eficiencia aumentó un 14%.	(Khan et al., 2018)
Tubo de calor	Sistema de refrigeración mediante tubo de calor, pulsante de una vuelta, este fue simulado con un panel solar monocristalino de 5W a una irradiación solar de 1000W/m ² .	Se obtuvo un aumento en la eficiencia del 18%	(Alizadeh et al., 2018)
Tubo de calor	Experimento realizado en Bagdad, se utilizó un panel de 80W y el sistema de refrigeración utilizado fue por tubo de calor. La temperatura del panel refrigerado se estuvo en el rango de 55 °C y 70 °C y en el panel no refrigerado estuvo entre 70 °C y 80 °C.	La eficiencia aumento un 14%.	(Habeeb et al., 2017)
Tubo de calor	En el experimento se utilizan dos paneles solares policristalinos de 5W, uno de ellos refrigerado mediante tubería de calor	Aumento en la eficiencia del 7,8%	(Tuaamah Al Hasnawi et al., 2021)

Nota. Realizada con información consultada de la literatura

Para una mejor visualización y presentación de la información relacionada en la Tabla 4, a continuación, en la Figura 35 se presenta por tecnología de refrigeración y de acuerdo con un experimento dado cual fue el porcentaje de aumento de la eficiencia.

Figura 35

Incremento en la eficiencia por tecnología de refrigeración



Nota. Gráfica realizada con los datos consultados en la literatura

De acuerdo con la figura anterior en la cual se relacionan 31 datos de las tecnologías de refrigeración seleccionadas para este trabajo, se puede evidenciar que la mayoría de los experimentos consultados se realizaron en módulos fotovoltaicos de baja potencia (menor a 180W). Pero se nota que los nanofluidos fueron probados en paneles de una potencia mayor. Contrario ocurre con los PCM, debido a que la mayoría de las pruebas experimentales fueron realizadas en paneles solares de baja potencia entre 5W y 70W. Considerando que para la refrigeración mediante PCM se requiere una cantidad considerable de material para bajar la temperatura en un grado Celsius.

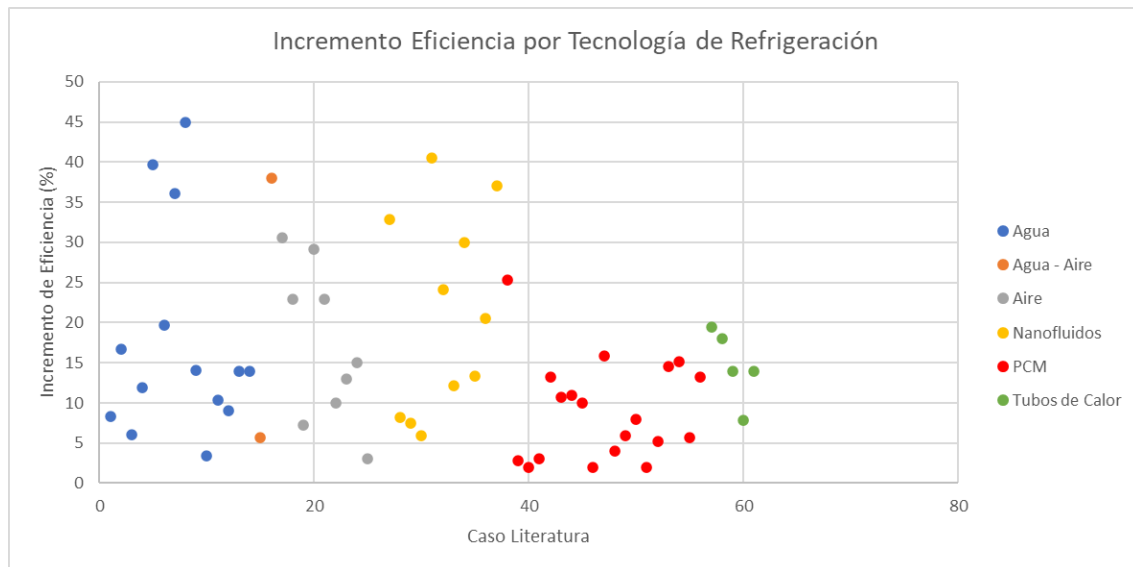
De acuerdo con esta gráfica se puede observar cual tecnología de refrigeración tuvo un aumento significativo de la eficiencia, de acuerdo con los experimentos consultados. Se evidencia que los

nanofluidos tuvieron el mayor efecto en la eficiencia con un aumento de 40,5%, seguido por uno de agua 39,7%, luego aire 30,55%, PCM 25,3%, tubo de calor 18% y agua-aire 5,7%. Se realizó el ejercicio de establecer un promedio de aumento en la eficiencia por cada una de las tecnologías de refrigeración, obteniendo lo siguiente. Para aire 26,7%, nanofluidos 19%, agua 16,62%, tubos de calor 13,2%, PCM 8,75% y agua-aire 5,7%.

Con el fin de mostrar una cantidad más alta de resultados sobre el aumento de la eficiencia aplicando las tecnologías de refrigeración propuestas, se completó los datos con resultados mostrados en los artículos disponibles, pero que no contenían el dato de potencia del panel utilizado en el experimento. Se realizó la Figura 36 con 61 datos donde se muestra los resultados obtenidos.

Figura 36

Incremento en la eficiencia por tecnología de refrigeración



Nota. Gráfica realizada con los datos consultados en la literatura

Realizando una revisión de los datos de la figura anterior, se evidencia que uno de los experimentos con un resultado mayor en el porcentaje de aumento de la eficiencia se obtuvo utilizando como medio refrigerante el agua 45%, seguido de nanofluidos 40,5%, luego agua-aire 38%, aire 30,55%, PCM 25,3% y tubos de calor 19,45%.

Se realizó un promedio de los resultados obtenidos por cada tecnología de refrigeración y se tienen los siguientes resultados. Agua-aire 21,85%, nanofluidos 21,1%, agua 17,72%, aire 16,45%, tubos de calor 14,63% y PCM 8,92%. Lo cual es un resultado más confiable, dado que la cantidad de datos reportados fue mayor que los reportados en el ejercicio inicial.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Las tecnologías de refrigeración que logran mejores resultados son las que utilizan agua, entre estas los nanofluidos que utilizan este líquido como fluido base. Sin embargo, cada una de estas tecnologías de refrigeración tiene puntos a favor y en contra, los cuales se relacionan en la Tabla 5.

Tabla 5

Ventajas y desventajas de las tecnologías de refrigeración

Tecnología	Ventajas	Desventajas	Referencia
Aire	El bajo costo de operación y el uso mínimo de materiales son dos ventajas destacadas de la tecnología de refrigeración por aire.	Consumo de energía eléctrica adicional porque se utiliza bomba o ventilador, en la refrigeración activa por aire. Rendimiento deficiente de los modos pasivo y activo en climas cálidos.	(Gharzi et al., 2020), (Siah Chehreh Ghadikolaei, 2021)
Agua	Además de usar el agua como refrigerante de las celdas en los paneles fotovoltaicos, se usa el agua tibia después del proceso de enfriamiento. Rociar agua o crear una película de agua en la superficie del panel fotovoltaico no solo actúa como refrigerante, sino que también limpia la superficie del panel fotovoltaico, lo que evita la deposición de contaminación por polvo que también afecta la eficiencia del módulo fotovoltaico. Más eficiente que la refrigeración por aire.	Desperdicio de agua debido a la refrigeración de módulos fotovoltaicos al rociar y crear una película de agua en la superficie. Uso de energía eléctrica adicional para bombear y rociar agua sobre la superficie del panel fotovoltaico. Alto costo inicial.	(Gharzi et al., 2020), (Siah Chehreh Ghadikolaei, 2021)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Tecnología	Ventajas	Desventajas	Referencia
Tubos de calor	<p>Mejora de la generación de energía térmica y eléctrica, simultáneamente.</p> <p>Disminuye la temperatura de las celdas fotovoltaicas sin utilizar energía externa para la refrigeración.</p> <p>Compatible en todos los climas.</p>	<p>Esta tecnología de refrigeración no es adecuada para la gestión térmica de los módulos fotovoltaicos a gran escala.</p> <p>La mejora de la eficiencia por refrigeración de tubería de calor no es muy alta.</p> <p>Alto costo inicial.</p>	(Gharzi et al., 2020), (Siah Chehreh Ghadikolaei, 2021)
PCM	<p>Efecto de enfriamiento y mejora de la eficiencia a un nivel aceptable.</p> <p>Almacena grandes valores de energía térmica con bajo cambio de temperatura.</p>	<p>La elección del PCM apropiado depende completamente de las condiciones climáticas locales, por lo que utilizar un PCM inapropiado revelaría un resultado diverso y dañaría las celdas fotovoltaicas.</p> <p>La tecnología de refrigeración por PCM funciona solo para los lugares con un clima cálido y variaciones de temperatura mínimas entre las estaciones.</p> <p>Disminución de la absorción de calor con el tiempo.</p> <p>Bajo rendimiento en las regiones frías.</p> <p>El costo de las materias primas es elevado.</p>	(Gharzi et al., 2020), (Siah Chehreh Ghadikolaei, 2021)
Nanofluidos	<p>La eficiencia eléctrica está en un nivel excelente.</p> <p>Compatible en todos los climas.</p>	<p>El uso de la tecnología de refrigeración por nanofluidos no es rentable a gran escala, debido al alto costo de algunas nanopartículas.</p>	(Gharzi et al., 2020), (Siah Chehreh Ghadikolaei, 2021)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Tecnología	Ventajas	Desventajas	Referencia
		Caída de presión y sedimentación a lo largo de la trayectoria del flujo que contiene nanofluidos de refrigeración para los sistemas PV/T a gran escala.	

Nota. Realizado con información encontrada en la literatura.

En este capítulo se realizó una extracción de los resultados reportados en la literatura de las diferentes tecnologías de refrigeración, donde se evidenció que los mejores resultados en el aumento de la eficiencia se obtuvieron en las que utilizan agua, teniendo en cuenta los nanofluidos que utilizan este líquido como fluido base. Los resultados promedio en el aumento de la eficiencia fueron los siguientes. Agua-aire 21,85%, nanofluidos 21,1%, agua 17,72%, aire 16,45%, tubos de calor 14,63% y PCM 8,92%. Se debe tener en cuenta que los PCM es una tecnología de refrigeración pasiva y que tiene mejor desempeño en climas cálidos. Las tecnologías de refrigeración activas requieren de equipos adicionales como bombas o ventiladores, los cuales consumen energía adicional para que el sistema funcione, sin embargo, se pueden utilizar en las regiones con clima cálido o frío, pero algo que tienen en común es el costo de inversión inicial elevado.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

El incremento de la temperatura impacta negativamente la eficiencia de las celdas solares, causando que el rendimiento de estos elementos disminuya. El parámetro que se afecta fuertemente con el aumento de la temperatura es la corriente de saturación del diodo I_0 impactando directamente el voltaje de circuito abierto V_{OC} , dado su relación directa con la potencia, se reduce el rendimiento de la celda solar, haciendo que por cada grado Celsius que aumenta la temperatura, la eficiencia se reduzca entre 0,2% y 0,5%. Las celdas de silicio monocristalino y policristalino son más afectadas por esta variable que las de capa fina (thin film), debido a que el coeficiente de temperatura es mayor.

Las tecnologías de refrigeración por agua y aire son las más sencillas y pueden ser activas o pasivas, los sistemas activos son los que requieren equipos adicionales para mover el fluido y los sistemas pasivos no requieren equipo mecánico adicional ni una fuente de alimentación externa para impulsar el sistema de refrigeración. Sin embargo, logran mejores resultados los sistemas activos. Los nanofluidos tienen una conductividad térmica más alta que la de los fluidos base, sin embargo, es una tecnología muy costosa. Los PCM es una tecnología pasiva de refrigeración, funcionan mejor en climas cálidos, se utilizan resinas o sales hidratadas, no obstante, para reducir la temperatura del módulo solar en 1°C es necesario 2,6 kg/m², lo que hace que el sistema quede muy pesado, además el periodo de amortización es muy alto. La tecnología de refrigeración utilizando tubos de calor puede presentar algunos fenómenos que limitan el rendimiento térmico, los cuales son la capilaridad o límite de absorción, el límite de arrastre y el límite de ebullición.

Las tecnologías de refrigeración que logran un mejor resultado son las que funcionan con agua, dado a que tiene una buena conductividad térmica, incluyendo los nanofluidos que utilizan este líquido como fluido base. De acuerdo con los resultados extraídos de la literatura el aumento promedio de la eficiencia según la tecnología de refrigeración es Agua-aire 21,85%, nanofluidos 21,1%, agua 17,72%, aire 16,45%, tubos de calor 14,63% y PCM 8,92%. Se debe tener en cuenta que las tecnologías de refrigeración van a lograr mejores resultados en aquellos módulos fotovoltaicos en los cuales el coeficiente de temperatura sea mayor, debido a que se ven más afectados por la temperatura, en otras palabras, van a ser más efectivas en módulos monocristalinos y policristalinos que en los módulos de capa fina (thin film).

Como trabajo futuro se propone realizar una evaluación técnico-económica de cada una de estas tecnologías de refrigeración para analizar la viabilidad en las instalaciones con módulos fotovoltaicos.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

REFERENCIAS

- 6, C. (2021). *Ranking de países con mayor capacidad de energía solar en 2021*. Publicación WEB. <https://www.catorce6.com/actualidad-ambiental/internacional/19298-ranking-de-paises-con-mayor-capacidad-de-energia-solar-en-2021>
- Acosta, A. (2011). La Crisis Energética Y Las Energías Alternativas. *Energy Economics*, 32(8), 1–19.
- Adeeb, J., Farhan, A., & Al-Salaymeh, A. (2019). Temperature effect on performance of different solar cell technologies. *Journal of Ecological Engineering*, 20(5), 249–254. <https://doi.org/10.12911/22998993/105543>
- Ahmed, A. M., & Hassan Danook, S. (2018). Efficiency improvement for solar cells panels by cooling. *2nd International Conference for Engineering, Technology and Sciences of Al-Kitab, ICETS 2018*, 39–42. <https://doi.org/10.1109/ICETS.2018.8724625>
- Alizadeh, H., Ghasempour, R., Shafii, M. B., Ahmadi, M. H., Yan, W. M., & Nazari, M. A. (2018). Numerical simulation of PV cooling by using single turn pulsating heat pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 203–208. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.06.108>
- Aref, L., Fallahzadeh, R., Shabanian, S. R., & Hosseinzadeh, M. (2021). A novel dual-diameter closed-loop pulsating heat pipe for a flat plate solar collector. *Energy*, 230, 120751. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120751>
- Belhadj, C. A., Banat, I. H., & Deriche, M. (2017). *Spot Phenomena based on the Bishop Model*. 222–227.
- Bonah, E., Praveenkumar, S., Alwan, N. T., Ivanovich, V., & Shcheklein, S. E. (2021). Heliyon Effect of dual surface cooling of solar photovoltaic panel on the efficiency of the module : experimental investigation. *Heliyon*, 7(August), e07920. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07920>
- Carmona, M., Palacio Bastos, A., & García, J. D. (2021). Experimental evaluation of a hybrid photovoltaic and thermal solar energy collector with integrated phase change material (PVT-PCM) in comparison with a traditional photovoltaic (PV) module. *Renewable Energy*, 172, 680–696. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.022>
- Carrasco. (2014). Universidad Nacional Del Centro Del Peru. *Universidad Nacional Del Centro Del Centro De Posgrado*, 10–11. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/5992>
- Carrera, P. F. De. (2012). *Materiales de Cambio de Fase . Diseño de una instalación para la caracterización de PCM a altas temperaturas*.
- Casavilca, C., & Dueñas, K. (2019). Modelamiento matemático y validación experimental para incrementar la eficiencia de un panel fotovoltaico en un sistema híbrido. *Universidad Nacional Del Centro Del Peru De Posgrado*, 87. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/5992>
- Cata, J., & Rodríguez, F. (2015). Análisis Matemático De Un Panel Solar Fotovoltaico De Silicio. *Tesis Previa a La Obtención Del Título De Ingeniero Eléctrico*, 113. <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10250/1/UPS-GT001338.pdf>
- Cengel. (2009). Termodinámica de Cengel. *Termodinámica*, 1001. <http://librosysolucionarios.net/>
- Cuchicóndor, S. (2019). *Estimación De Irradiancia Solar Basada En Modelos Matemáticos Y Medición De Variables Eléctricas De Paneles Fotovoltaicos*. 1, 159. https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20171/1/CD_9640.pdf
- Dubey, S., Sarvaiya, J. N., & Seshadri, B. (2013). Temperature dependent photovoltaic (PV)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- efficiency and its effect on PV production in the world - A review. *Energy Procedia*, 33, 311–321. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.072>
- Edumedia. (2022). *Teoría de Bandas de Semiconductores*. Publicación WEB. <https://www.edumedia-sciences.com/es/media/949-teoria-de-bandas-de-semiconductores>
- Elminshawy, N. A. S., Mohamed, A. M. I., Morad, K., Elhenawy, Y., & Alrobaian, A. A. (2019). Performance of PV panel coupled with geothermal air cooling system subjected to hot climatic. *Applied Thermal Engineering*, 148(October 2018), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.027>
- Energéticos, C. (2022). *Materiales de cambio de fase para mejorar la eficiencia energética de edificios*. Publicación WEB. <https://www.certificadosenergeticos.com/materiales-de-cambio-de-fase-mejorar-eficiencia-energetica-edificios>
- Energía, M. de M. y. (2021). *Resolución 40030 de 30 diciembre 2021.pdf*. https://www.minenergia.gov.co/documents/10180//23517//49178-40430_2021.pdf
- Expertos en Mercados - XM S.A. E.S.P. (2021). *Informe Oferta y Generación Agosto 2021 Reservas hídricas*. https://www.xm.com.co/Informes Mensuales de Anlisis del Mercado/02_Informe_Oferta_y_Generacion_08_2021.pdf
- Fagua, A. L., & Bernal S., W. F. (2015). Celdas Solares Orgánicas Organic Solar Cells Células solares orgánicas. *Revista Ciencia, Innovación y Tecnología (RCIYT)*, II, 71–81.
- Gharzi, M., Arabhosseini, A., Gholami, Z., & Rahmati, M. H. (2020). Progressive cooling technologies of photovoltaic and concentrated photovoltaic modules: A review of fundamentals, thermal aspects, nanotechnology utilization and enhancing performance. *Solar Energy*, 211(July), 117–146. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.09.048>
- González Estrada, T., Valencia Marín, J. A., & (UPME), U. de P. M. E. (2015). Integración de las Energías Renovables No Convencionales en Colombia. In *Unidad de Planeación Minero Energética*. http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_W EB.pdf
- González, J. A. C., Pérez, R. C., Santos, A. C., & Gil, M. A. C. (n.d.). *Centrales de energías renovables*. Granda-Gutiérrez, E. E., Orta-Salomón, O. A., Díaz-Guillén, J. C., Jimenez, M. A., Osorio, M., & González, M. A. (2013). Modelado y Simulación de Celdas y Paneles Solares. ISSN:1405-2172. *Congr. Int. Ing. Electrón. Mem. Electro 2013, September 2014*, 17–22. <https://doi.org/10.13140/2.1.4192.8968>
- Gupta, S. K., & Pradhan, S. (2021). A review of recent advances and the role of nanofluid in solar photovoltaic thermal (PV / T) system. *Materials Today: Proceedings*, 44, 782–791. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.708>
- Habeeb, L., Ghanim, D., Habeeb, L. J., Ghanim Mutasher, D., Muslim, F. A., & Ali, A. (2017). Cooling Photovoltaic Thermal Solar Panel by Using Heat Pipe at Baghdad Climate. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS*, 17(06), 6. <https://www.researchgate.net/publication/329196967>
- Hamzat, A. K., Sahin, A. Z., Omisanya, M. I., & Alhems, L. M. (2021). Advances in PV and PVT cooling technologies: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47(May), 101360. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101360>
- Hussien, H. A., Hasanuzzaman, M., Noman, A. H., & Abdulmunem, A. R. (2014). Enhance photovoltaic/thermal system performance by using nanofluid. *IET Seminar Digest*, 2014(CP659), 5–9. <https://doi.org/10.1049/cp.2014.1515>
- IDEAM. (2022). *Radiación Solar*. Sitio WEB. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y->

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

clima/radiacion-solar-ultravioleta

- IRENA. (2021a). *Capacidad Instalada Colombia*. Sitio WEB. <https://www.irena.org/solar>
- IRENA. (2021b). Nuevo récord mundial de capacidad energética renovable en 2020 - Comunicado de prensa. *Irena*, 1–3.
- J. Bishop. (1988). Computer simulation of the effects of electrical mismatches in photovoltaic cell interconnection circuits. *Solar Cells*, 25, 73–89.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0379-6787\(88\)90059-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0379-6787(88)90059-2)
- Jasim, O. M. J., Selimli, S., Dumrul, H., & Yilmaz, S. (2022). Closed-loop aluminium oxide nanofluid cooled photovoltaic thermal collector energy and exergy analysis, an experimental study. *Journal of Energy Storage*, 50(December 2021), 104654.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104654>
- Kandeal, A. W., Thakur, A. K., Elkadeem, M. R., Elmorshedy, M. F., Ullah, Z., Sathyamurthy, R., & Sharshir, S. W. (2020). Photovoltaics performance improvement using different cooling methodologies: A state-of-art review. *Journal of Cleaner Production*, 273, 122772.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122772>
- Khan, M. S., Hegde, V., & Shankar, G. (2018). Effect of Temperature on Performance of Solar Panels-Analysis. *International Conference on Current Trends in Computer, Electrical, Electronics and Communication, CTCEEC 2017*, 109–113.
<https://doi.org/10.1109/CTCEEC.2017.8455109>
- Kumar, K. S., Revanth, S., Sanjeev, D., Kumar, P. S., & Surya, P. (2021). Experimental investigation of improving the energy conversion efficiency of PV cell by integrating with PCM. *Materials Today: Proceedings*, 37, 712–716. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.723>
- Kumar, S., Omprakash, P., Goel, V., & Bhattacharyya, S. (2022). A detailed review on the performance of photovoltaic / thermal system using various cooling methods. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 51(August 2021), 101844.
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101844>
- Laseinde, O. T., & Ramere, M. D. (2021). Efficiency Improvement in polycrystalline solar panel using thermal control water spraying cooling. *Procedia Computer Science*, 180, 239–248.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.161>
- Lebbi, M., Touafek, K., Benchatti, A., Boutina, L., Khelifa, A., Baissi, M. T., & Hassani, S. (2021). Energy performance improvement of a new hybrid PV/T Bi-fluid system using active cooling and self-cleaning: Experimental study. *Applied Thermal Engineering*, 182(September 2020), 116033. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116033>
- Málaga, U. de. (2022). *Determinación de la banda prohibida en semiconductores*. Publicación WEB. http://webpersonal.uma.es/~JMPEULA/banda_prohibida.html#:~:text=La anchura de la banda prohibida en los semiconductores es,a la banda de conducción
- Maleki, A., Haghghi, A., El Haj Assad, M., Mahariq, I., & Alhuyi Nazari, M. (2020). A review on the approaches employed for cooling PV cells. *Solar Energy*, 209(June), 170–185.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.083>
- Matsumoto, Y. (2011). Caos Conciencia 5: 32-44 CELDAS SOLARES DE SILICIO: FUNDAMENTO Y TENDENCIA. *Division de Ciencias e Ingenieria Universidad de Quintana Roo*, 1954, 44.
- Nebali, D., Nebali, R., & Ouibrahim, A. (2016). Enhanced efficiency of a solar photovoltaic concentration system cooled by a pulsed air. *Proceedings of 2015 IEEE International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2015*, 1–4.
<https://doi.org/10.1109/IRSEC.2015.7455089>
- Ni, S. (2021). *A novel and effective passive cooling strategy for photovoltaic panel*. 145(April).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111164>
- NREL. (2022). NREL. Publicación WEB. <https://www.nrel.gov/>
- ONU. (2022). *El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético sostenible*. Publicación WEB. <https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible>
- Ortiz Núñez, G., Robles Algarín, C., Pérez Tobón, J., Ospino Castro, A., & Martínez Lengua, A. (2020). *Evaluación del desempeño de los modelos de un diodo y dos diodos para módulos fotovoltaicos*. 41(36), 152–170.
- PVeducation. (2022). *PVeducation*. Publicación WEB. <https://www.pveducation.org/>
- Rajvikram, M., Leoanraj, S., Ramkumar, S., Akshaya, H., & Dheeraj, A. (2019). Experimental investigation on the abasement of operating temperature in solar photovoltaic panel using PCM and aluminium. *Solar Energy*, 188(February), 327–338. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.05.067>
- República, L. (2022). *Expandir soluciones fotovoltaicas*. Publicación WEB. <https://www.larepublica.co/analisis/jose-david-name-507206/expandir-soluciones-fotovoltaicas-3316282>
- Rojas, C. Z. (2012). Desarrollo Histórico de los Tubos de Calor y sus Aplicaciones. *Contribuciones Científicas y Tecnológicas*, 50–59.
- Salameh, T., Zhang, D., Juaidi, A., Alami, A. H., Al-Hinti, I., & Olabi, A. G. (2021). Review of solar photovoltaic cooling systems technologies with environmental and economical assesment. *Journal of Cleaner Production*, 326(October), 129421. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129421>
- Sasidharan, N., Ongsakul, W., Varghese, M. P., Anooja, V. S., & Akhila, R. (2018). Efficient improvement of solar photo voltaic system using artificial cooling methods. *EPSCICON 2018 - 4th International Conference on Power, Signals, Control and Computation*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/EPSCICON.2018.8379593>
- Sathe, T. M., & Dhoble, A. S. (2017). A review on recent advancements in photovoltaic thermal techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76(October 2016), 645–672. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.075>
- Savvakis, N., & Tsoutsos, T. (2021). Theoretical design and experimental evaluation of a PV+PCM system in the mediterranean climate. *Energy*, 220, 119690. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119690>
- Senthil, R., Madurai Elavarasan, R., Pugazhendhi, R., Premkumar, M., Vengadesan, E., Navakrishnan, S., Islam, M. R., & Natarajan, S. K. (2021). A holistic review on the integration of heat pipes in solar thermal and photovoltaic systems. *Solar Energy*, 227(September), 577–605. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.09.036>
- Sharma, N. K., Gaur, M. K., & Malvi, C. S. (2020). Application of phase change materials for cooling of solar photovoltaic panels: A review. *Materials Today: Proceedings*, 47, 6759–6765. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.127>
- Sharma, R., Singh, S., Mehra, K. S., & Kumar, R. (2021). Performance enhancement of solar photovoltaic system using different cooling techniques. *Materials Today: Proceedings*, 46, 11023–11028. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.132>
- Shubbak, M. H. (2019). Advances in solar photovoltaics: Technology review and patent trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115(June 2018), 109383. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109383>
- Siah Chehreh Ghadikolaie, S. (2021). Solar photovoltaic cells performance improvement by cooling

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- technology: An overall review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(18), 10939–10972. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.164>
- Singh, K., Singh, S., Kandpal, D. C., & Kumar, R. (2020). Experimental performance study of photovoltaic solar panel with and without water circulation. *Materials Today: Proceedings*, 46, 6822–6827. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.393>
- Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*, 83(5), 614–624. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>
- Sohani, A., Shahveredian, M. H., Sayyaadi, H., Samiezadeh, S., Doranehgard, M. H., Nizetic, S., & Karimi, N. (2021). Selecting the best nanofluid type for A photovoltaic thermal (PV/T) system based on reliability, efficiency, energy, economic, and environmental criteria. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 124, 351–358. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.02.027>
- Solar-Energía. (2022). *Solar-Energía*. Publicación WEB. <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/panel-fotovoltaico/celula-fotovoltaica/tipos>
- Statista. (2022). *Distribución porcentual de la generación de electricidad en el mundo en 2019, por fuente de energía*. Publicación WEB. <https://es.statista.com/estadisticas/600383/electricidad-generada-en-el-mundo-por-fuente-energetica/>
- Tembhare, S. P., Barai, D. P., & Bhanvase, B. A. (2022). Performance evaluation of nanofluids in solar thermal and solar photovoltaic systems : A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 153(September 2021), 111738. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111738>
- Tuaamah Al Hasnawi, A. G., Kadhim Judran, H., & Khalil Ibrahim, A. (2021). Experimental Investigation of Cooling Solar Photovoltaic (Pv) Cells By Using Heat Pipe Approach. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 56, 815–818.
- Tuncel, B., Ozden, T., Balog, R. S., & Akinoglu, B. G. (2020). Dynamic thermal modelling of PV performance and effect of heat capacity on the module temperature. *Case Studies in Thermal Engineering*, 22(May), 100754. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100754>
- UPME. (2021). *Boletín estadístico de minas y energía 2016 - 2020*. 1–173. https://www1.upme.gov.co/PromocionSector/SeccionesInteres/Documents/Boletines/Boletin_Estadistico_ME_2016-2020.pdf
- Vanguardia. (2021). *En Colombia hay ocho capitales sin cobertura total de energía*. Publicación WEB. <https://www.vanguardia.com/colombia/en-colombia-hay-ocho-capitales-sin-cobertura-total-de-energia-AK3826165>
- Velmurugan, K., & Kumarasamy, S. (2021). Review of PCM types and suggestions for an applicable cascaded PCM for passive PV module cooling under tropical climate conditions. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126065. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126065>
- Verma, S., Mohapatra, S., Chowdhury, S., & Dwivedi, G. (2020). Cooling techniques of the PV module: A review. *Materials Today: Proceedings*, 38, 253–258. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.130>
- Víctor González Zamora. (2020). Efecto sombra en los paneles solares 1. *CITE Energía*.
- Yesildal, F., Ozakin, A. N., & Yakut, K. (2022). Optimization of operational parameters for a photovoltaic panel cooled by spray cooling. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 25, 100983. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.04.002>
- Zubeer, S. A., & Ali, O. M. (2022). Experimental and numerical study of low concentration and

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

water-cooling effect on PV module performance. *Case Studies in Thermal Engineering*, 34(April), 102007. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102007>

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

ANEXOS

Se anexa figuras con los datos tomados para construir los gráficos sobre el porcentaje de aumento de la eficiencia por tecnología de refrigeración.

Tecnología Refrigeración	Potencia (W)	Aumento de la Eficiencia (%)	Referencia	Observación
Agua	150	8,3	(Ahmed & Hassan Danook, 2018)	
Agua	17	16,65	(Laseinde & Ramere, 2021)	
Agua	10	6,08	(Singh et al., 2020)	
Agua	30	11,9	(Bonah et al., 2021)	
Agua	50	39,7	(Yesildal et al., 2022)	
Agua	320	19,71	(Zubeer & Ali, 2022)	
Agua	170	14	(Khan et al., 2018)	
Agua - Aire	90	5,7	(Lebbi et al., 2021)	
Aire	50	30,55	(Nebballi et al., 2016)	
Aire	250	22,98	(Elminshawy et al., 2019)	
Nanofluidos	400	32,9	(Hussien et al., 2014)	
Nanofluidos	250	8,19	(Sohani et al., 2021)	
Nanofluidos	250	7,53	(Sohani et al., 2021)	Datos artículo
Nanofluidos	250	5,9	(Sohani et al., 2021)	Datos artículo
Nanofluidos	20	40,5	(Jasim et al., 2022)	
PCM	12	25,3	(K. S. Kumar et al., 2021)	Combinado
PCM	250	2,8	(Savvakis & Tsoutsos, 2021)	Tabla de artículo
PCM	50	2	(Savvakis & Tsoutsos, 2021)	Tabla de artículo
PCM	11	3,1	(Savvakis & Tsoutsos, 2021)	Tabla de artículo
PCM	30	13,2	(Savvakis & Tsoutsos, 2021)	Tabla de artículo
PCM	65	10,7	(Savvakis & Tsoutsos, 2021)	Tabla de artículo
PCM	24	11	(Savvakis & Tsoutsos, 2021)	Tabla de artículo
PCM	70	10	(Savvakis & Tsoutsos, 2021)	Tabla de artículo
PCM	5	2	(Savvakis & Tsoutsos, 2021)	Tabla de artículo
PCM	175	15,9	(Savvakis & Tsoutsos, 2021)	Tabla de artículo
PCM	40	4	(Savvakis & Tsoutsos, 2021)	Tabla de artículo
PCM	130	5,9	(Savvakis & Tsoutsos, 2021)	Tabla de artículo
PCM	50	7,9	(R. Sharma et al., 2021)	
Tubo de calor	5	18	(Alizadeh et al., 2018)	
Tubo de calor	80	14	(Habeeb et al., 2017)	
Tubo de calor	5	7,8	(Tuaamah Al Hasnawi et al., 2021)	

Tecnología Refrigeración	Caso	Aumento de la Eficiencia (%)	Referencia
Agua	1	8,3	(Ahmed & Hassan Danook, 2018)
Agua	2	16,65	(Laseinde & Ramere, 2021)
Agua	3	6,08	(Singh et al., 2020)
Agua	4	11,9	(Bonah et al., 2021)
Agua	5	39,7	(Yesildal et al., 2022)
Agua	6	19,71	(Zubeer & Ali, 2022)
Agua	7	36,1	A review on the approaches employed for cooling PV cells
Agua	8	45	A review on recent advancements in photovoltaic thermal techniques
Agua	9	14,1	Application of nanofluids and fluids in photovoltaic thermal system: An updated review
Agua	10	3,37	Different Types of Cooling Systems Used in Photovoltaic Module Solar System: A Review
Agua	11	10,3	Different Types of Cooling Systems Used in Photovoltaic Module Solar System: A Review
Agua	12	9	Different Types of Cooling Systems Used in Photovoltaic Module Solar System: A Review
Agua	13	14	(Khan et al., 2018)
Agua	14	14	Simulation study of air and water cooled photovoltaic panel using ANSYS
Agua - Aire	15	5,7	(Lebbi et al., 2021)
Agua - Aire	16	38	A review on the approaches employed for cooling PV cells
Aire	17	30,55	(Nebbali et al., 2016)
Aire	18	22,98	(Elminshawy et al., 2019)
Aire	19	7,2	A review on the approaches employed for cooling PV cells
Aire	20	29,11	A review on the approaches employed for cooling PV cells
Aire	21	22,98	A review on the approaches employed for cooling PV cells

Tecnología Refrigeración	Caso	Aumento de la Eficiencia (%)	Referencia
Aire	22	10	Application of nanofluids and fluids in photovoltaic thermal system: An updated review
Aire	23	12,93	Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systems
Aire	24	15	Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systems
Aire	25	3	Simulation study of air and water cooled photovoltaic panel using ANSYS
Aire	26	10,5	A review on the approaches employed for cooling PV cells
Nanofluidos	27	32,9	(Hussien et al., 2014)
Nanofluidos	28	8,19	(Sohani et al., 2021)
Nanofluidos	29	7,53	(Sohani et al., 2021)
Nanofluidos	30	5,9	(Sohani et al., 2021)
Nanofluidos	31	40,5	(Jasim et al., 2022)
Nanofluidos	32	24,1	A review on the approaches employed for cooling PV cells
Nanofluidos	33	12,1	A review of recent advances and the role of nanofluid in solar photovoltaic thermal (PV/T) system
Nanofluidos	34	30	A review of recent advances and the role of nanofluid in solar photovoltaic thermal (PV/T) system
Nanofluidos	35	13,3	Application of nanofluids and fluids in photovoltaic thermal system: An updated review
Nanofluidos	36	20,57	A review on the approaches employed for cooling PV cells
Nanofluidos	37	37,07	A review on the approaches employed for cooling PV cells
PCM	38	25,3	(K. S. Kumar et al., 2021)
PCM	39	2,8	(Savvakis & Tsoutsos, 2021)
PCM	40	2	(Savvakis & Tsoutsos, 2021)
PCM	41	3,1	(Savvakis & Tsoutsos, 2021)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Tecnología Refrigeración	Caso	Aumento de la Eficiencia (%)	Referencia
PCM	42	13,2	(Savvakis & Tsoutsos, 2021)
PCM	43	10,7	(Savvakis & Tsoutsos, 2021)
PCM	44	11	(Savvakis & Tsoutsos, 2021)
PCM	45	10	(Savvakis & Tsoutsos, 2021)
PCM	46	2	(Savvakis & Tsoutsos, 2021)
PCM	47	15,9	(Savvakis & Tsoutsos, 2021)
PCM	48	4	(Savvakis & Tsoutsos, 2021)
PCM	49	5,9	(Savvakis & Tsoutsos, 2021)
PCM	50	7,9	(R. Sharma et al., 2021)
PCM	51	2	Cooling techniques of the PV module: A review
PCM	52	5,18	Cooling techniques of the PV module: A review
PCM	53	14,5	Cooling techniques of the PV module: A review
PCM	54	15,2	Cooling techniques of the PV module: A review
PCM	55	5,7	Nano-enhanced cooling techniques for photovoltaic panels: A systematic review and prospect recommendations
PCM	56	13,2	Nano-enhanced cooling techniques for photovoltaic panels: A systematic review and prospect recommendations
Tubo de calor	57	19,45	Solar PV system with pulsating heat pipe cooling
Tubo de calor	58	18	(Alizadeh et al., 2018)
Tubo de calor	59	14	(Habeb et al., 2017)
Tubo de calor	60	7,8	(Tuaamah Al Hasnawi et al., 2021)
Tubo de calor	61	13,9	Advanced cooling techniques of P.V. modules: A state of art

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

FIRMA ESTUDIANTES

Fabión Linares.

FIRMA ASESORES

Adriana Rojas G.

Zemucel

FECHA ENTREGA: 10 de junio de 2022