

**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**SISTEMA DE POSGRADO**

**MAESTRIA EN ELECTRICIDAD CON MENCIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES  
Y EFICIENCIA ENERGÉTICA**

**TEMA:**

Evaluación de efectos térmicos en paneles solares aplicando las ecuaciones de Navier Stokes bajo diferentes condiciones climáticas estacionarias para la optimización en la producción de energía eléctrica

**AUTORA:**

**Ing. Ana Gabriela Tigse Lara**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del grado de**

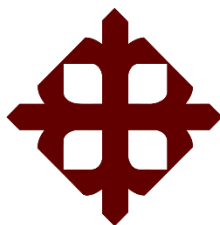
**MAGISTER EN ELECTRICIDAD CON MENCIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES  
Y EFICIENCIA ENERGÉTICA**

**TUTOR:**

**Ing. Bayardo Bohórquez Escobar, PhD**

**GUAYAQUIL, ECUADOR**

**Noviembre, 2023**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

MAESTRIA EN ELECTRICIDAD CON MENCIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES  
Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **Tigse Lara Ana Gabriela**, como requerimiento para la obtención del Título de **Magíster en Electricidad con Mención en Energías Renovables y Eficiencia Energética**.

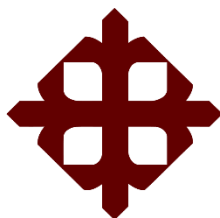
TUTOR

Ing. Bayardo Bohórquez Escobar, PhD

DIRECTOR DE CARRERA

Ing. Bayardo Bohórquez Escobar, PhD

Guayaquil, a los 23 días del mes de noviembre del año 2023



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**SISTEMA DE POSGRADO**

**MAESTRIA EN ELECTRICIDAD CON MENCIÓN EN ENERGÍAS  
RENOVABLES Y EFICIENCIA ENERGÉTICA**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

**Yo, Tigse Lara Ana Gabriela**

**DECLARO QUE:**

El Trabajo de Titulación, **Evaluación de efectos térmicos en paneles solares aplicando las ecuaciones de Navier Stokes bajo diferentes condiciones climáticas estacionarias para la optimización en la producción de energía eléctrica** previo a la obtención del Título de **Magíster en Electricidad con Mención en Energías Renovables y Eficiencia Energética**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

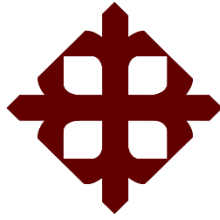
En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 23 días del mes de noviembre del año 2023

LA AUTORA

Ana Tigse Lara

Tigse Lara, Ana Gabriela



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

MAESTRIA EN ELECTRICIDAD CON MENCIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES  
Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **Tigse Lara Ana Gabriela**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Evaluación de efectos térmicos en paneles solares aplicando las ecuaciones de Navier Stokes bajo diferentes condiciones climáticas estacionarias para la optimización en la producción de energía eléctrica**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría

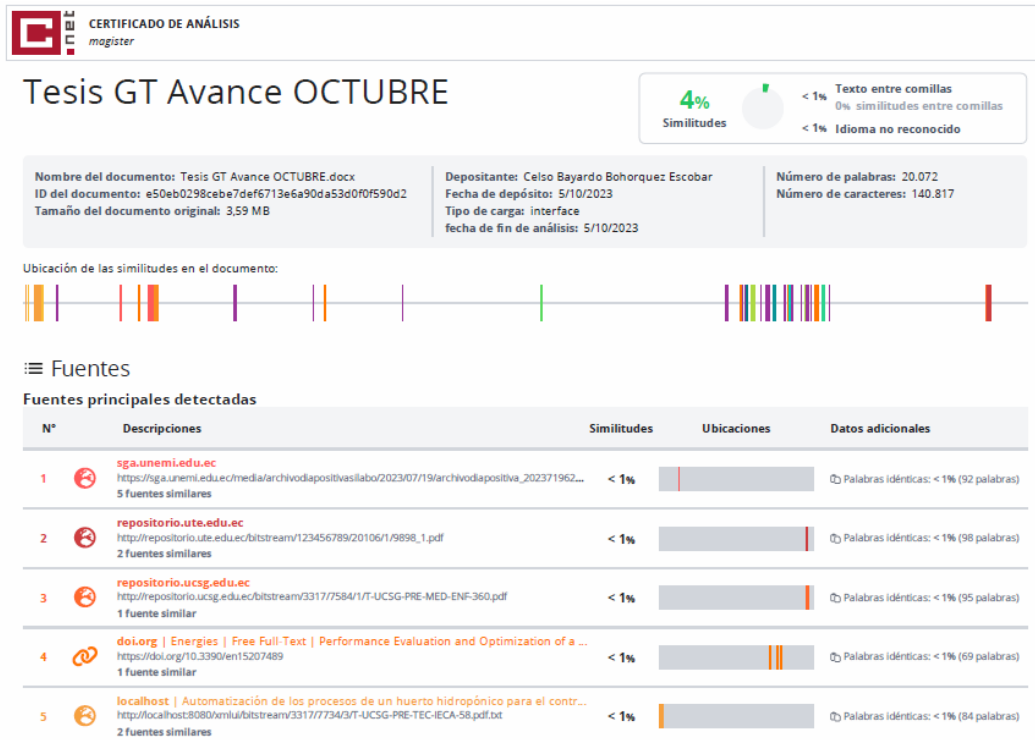
Guayaquil, a los 23 días del mes de noviembre del año 2023

LA AUTORA

Ana Tigse Lara

Tigse Lara, Ana Gabriela

## REPORTE ANTIPLAGIO COMPILATIO



Reporte COMPILATIO de la Ingeniera Tigse Lara Ana Gabriela, del Programa de Maestría en Electricidad con mención en energías renovables y eficiencia energética, con el tema **“Evaluación de efectos térmicos en paneles solares aplicando las ecuaciones de Navier Stokes bajo diferentes condiciones climáticas estacionarias para la optimización en la producción de energía eléctrica”**, mismos que se encuentra al 4% de coincidencias.

**Ing. Bayardo Bohórquez Escobar, PhD**  
**DOCENTE-TUTOR**

## **AGRADECIMIENTO**

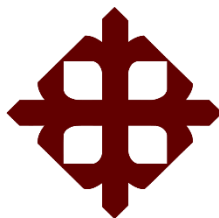
Quisiera comenzar agradeciendo a Dios, creador de todas las cosas, quien ha hecho posible que todos los caminos me lleven hasta este momento.

A mis padres, Agustín y Elizabeth, por siempre ser los pilares fundamentales en mi vida; gracias a ustedes es posible que pueda tener mi título de cuarto nivel, gracias por creer en mí.

De todo corazón gracias a todos ustedes, por siempre estar conmigo.

## **DEDICATORIA**

Dedico el presente trabajo de titulación a mis padres, sin el apoyo incondicional de ellos nada de esto hubiera sido posible.



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

MAESTRIA EN ELECTRICIDAD CON MENCIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES  
Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

---

**Ing. Bayardo Bohórquez Escobar, PhD**

TUTOR

---

**Ing. Gustavo Mazzini Muñoz, Mgs**

REVISOR

---

**Ing. Diana Bohórquez Heras, Mgs**

REVISOR

---

**Ing. Bayardo Bohórquez Escobar, PhD**

DIRECTOR DEL PROGRAMA



## Índice general

Índice de Figuras.....	XI
Índice de Tablas .....	XII
Resumen.....	XIII
Abstract.....	XIV
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I.....	3
ASPECTOS GENERALES.....	3
1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.2. Justificación .....	3
1.3. Delimitación .....	4
1.4. Objetivo general .....	5
1.4.1. Objetivos específicos.....	5
1.5. Hipótesis .....	5
1.6. Tipo de investigación y metodología .....	6
CAPÍTULO II .....	7
FUNDAMENTACION TEÓRICA.....	7
2.1. Estado del arte.....	7
2.2. Visión general.....	16
2.3. Transferencia de calor.....	18
2.4. Inspección eléctrica de sistemas fotovoltaicos.....	18
2.5. Onda característica corriente-voltaje .....	19
2.6. Corriente de cortocircuito.....	21
2.7. Voltaje de circuito abierto .....	22
2.8. Potencia en celdas solares .....	23
2.9. Factor de llenado .....	24
2.10. Ecuaciones de Navier-Stokes.....	25
2.11. Transferencia de calor.....	27
2.12. Energía Solar: Una Fuente Renovable e Inagotable .....	29

2.12.1. Beneficios de la energía solar: .....	30
2.12.2. Aplicaciones de la energía solar: .....	30
2.13. Paneles solares .....	30
<b>CAPITULO III.....</b>	<b>33</b>
<b>MODELACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA .....</b>	<b>33</b>
3.1. Metodología para la minimización de pérdida de energía por efectos térmicos. ....	33
3.2. Modelo térmico y análisis del sistema mediante CFD. ....	33
3.3. Modelo eléctrico del sistema .....	38
<b>CAPITULO IV .....</b>	<b>43</b>
<b>RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>43</b>
4.1. Exposición de resultados térmicos .....	43
4.1.1. Conjunto fotovoltaico – temperatura inicial baja.....	43
4.1.2. Conjunto fotovoltaico – temperatura inicial media .....	45
4.1.3. Conjunto fotovoltaico – temperatura inicial alta.....	47
4.2. Exposición de resultados eléctricos .....	49
4.2.1. Escenario 1: conjunto fotovoltaico – temperatura inicial baja .....	49
4.2.2. Escenario 2: conjunto fotovoltaico – temperatura inicial media .....	53
4.2.3. Escenario 3: conjunto fotovoltaico – temperatura inicial alta .....	56
4.2.4. Comparación de resultados .....	59
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>62</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>64</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>66</b>
Glosario de términos.....	74
Acrónimos.....	75
Anexos .....	77

## Índice de Figuras

Figura 1 Modelación de luz sobre unión semiconductor P.....	20
Figura 2 Comportamiento de corriente máxima de corto circuito .....	22
Figura 3 Comportamiento de voltaje máximo en circuito abierto .....	22
Figura 4 Punto de máxima potencia.....	24
Figura 5 Módulo fotovoltaico .....	31
Figura 6 Respuesta espectral de una célula solar de silicio y espectro de radiación solar.....	32
Figura 7. Modelo equivalente eléctrico de panel fotovoltaico.....	39
Figura 8. Comportamiento térmico – temperatura inicial baja .....	44
Figura 9. Comportamiento térmico – temperatura inicial media .....	46
Figura 10. Comportamiento térmico – temperatura inicial alta .....	48
Figura 11. Comportamiento eléctrico – temperatura inicial baja.....	50
Figura 12. Comportamiento P-V – temperatura inicial baja.....	50
Figura 13. Comportamiento eléctrico – temperatura inicial media .....	54
Figura 14. Comportamiento P-V – temperatura inicial media, escenario 2.....	54
Figura 15. Comportamiento I-V – temperatura inicial alta, escenario 3.....	57
Figura 16. Comportamiento P-V – temperatura inicial alta, escenario 3.....	57
Figura 17. Comparación de resultados.....	60

## Índice de Tablas

Tabla 1. Diferencia entre conducción, convección y radiación. ....	28
Tabla 2. Análisis componente térmico.....	38
Tabla 3. Análisis componente eléctrico .....	42
Tabla 4. Gradiente de temperatura escenario 1.....	45
Tabla 5. Gradiente de temperatura escenario 2.....	46
Tabla 6. Gradiente de temperatura escenario 3.....	48
Tabla 7. Gradiente de temperatura escenario 1.....	49
Tabla 8. Cálculo de eficiencia por celda. ....	52
Tabla 9. Potencia total de arreglo fotovoltaico .....	52
Tabla 10. Gradiente de temperatura escenario 2.....	53
Tabla 11. Cálculo de eficiencia por celda, escenario 2.....	55
Tabla 12. Potencia total de arreglo fotovoltaico, escenario 2 .....	55
Tabla 13. Gradiente de temperatura escenario 3.....	56
Tabla 14. Cálculo de eficiencia por celda, escenario 3.....	59
Tabla 15. Potencia total de arreglo fotovoltaico, escenario 3 .....	59
Tabla 16. Comparación de resultados .....	60

## Resumen

Esta investigación aborda la generación de electricidad mediante la minimización de las pérdidas asociadas al análisis térmico de los paneles fotovoltaicos. El comportamiento térmico de los paneles se expone por medio las expresiones de Navier-Stokes, y el modelo se resuelve usando el software Autodesk CFD (dinámica de fluidos computacional). Los datos de temperatura obtenidos para todo el conjunto fotovoltaico se utilizan para calcular las corrientes y voltajes de máxima potencia, lo que permite determinar la potencia eléctrica total del sistema, así como la de cada panel fotovoltaico individual.

Se definieron tres escenarios para investigar la incidencia de temperatura e identificar los parámetros relevantes a la hora de utilizar la refrigeración por convección natural en un sistema fotovoltaico. El análisis posterior se centró en la eficiencia eléctrica de los paneles fotovoltaicos basada en la potencia obtenida y calculada. Los resultados muestran que, con un espaciamiento uniforme tanto en filas como en columnas, una temperatura inicial baja ( $19^{\circ}\text{C}$ - $26^{\circ}\text{C}$ ) implica una mayor eficiencia de las celdas solares y una mayor producción de potencia.

**Palabras Clave:** análisis por efectos térmicos, Paneles fotovoltaicos, Navier Stokes, punto de máxima potencia, corriente de máxima potencia, voltaje de máxima potencia, dinámica de fluidos

## **Abstract**

This research addresses electricity generation by minimizing losses associated with the thermal analysis of photovoltaic panels. The thermal behavior of the panels is exposed through the Navier-Stokes expressions, and the model is solved using Autodesk CFD (computational fluid dynamics) software. The temperature data obtained for the entire photovoltaic assembly is used to calculate the maximum power currents and voltages, which allows determining the total electrical power of the system, as well as that of each individual photovoltaic panel.

Three scenarios were defined to investigate the temperature incidence and identify the relevant parameters when using natural convection cooling in a photovoltaic system. The subsequent analysis focused on the electrical efficiency of the photovoltaic panels based on the power obtained and calculated. The results show that, with uniform spacing in both rows and columns, a low initial temperature (19°C-26°C) implies higher solar cell efficiency and greater power production.

**Keywords:** thermal effects analysis, Photovoltaic panels, Navier Stokes, maximum power point, maximum power current, maximum power voltage, fluid dynamics.

## INTRODUCCIÓN

La conversión de la energía solar en electricidad tiene en cuenta una serie de factores pertinentes, que incluyen la irradiación, la eficiencia, la velocidad del viento y la temperatura, la última de las cuales es importante porque el enfriamiento ideal implica la máxima producción de energía eléctrica (Akbari et al., 2018). Dado que una temperatura de funcionamiento más baja implica un aumento significativo de la eficiencia, el esfuerzo por optimizar el perfil de temperatura de los paneles fotovoltaicos es fundamental. Existen varias opciones, la primera de las cuales se basa en incorporar material de cambio de fase para el intercambio de calor y posteriormente paneles de ventilación. La segunda opción es usar el método de volumen finito para modelar el ensamblaje del panel en 2 y 3 dimensiones (Romero Jacobo, 2015). Los cambios en el material de construcción del panel fotovoltaico son la tercera opción (Aerodinámicas, 2013) (Ali et al., 2015).

Los mecanismos complejos de transferencia de calor, que incluyen conducción, convección y radiación, están involucrados en la disipación de calor. Debido a que estos fenómenos no pueden estudiarse utilizando métodos estándar, se requieren técnicas avanzadas, como simulaciones numéricas de alto nivel conocidas como CFD, para su análisis (Sellami et al., 2016).

De acuerdo con las técnicas mencionadas, los arreglos fotovoltaicos necesitan un modelo térmico para explicar su comportamiento, como las ecuaciones de Navier Stokes (Anderson et al., 2015). El análisis térmico consiste en obtener resultados de temperatura a partir de un software computacional que sirvan como parámetros para obtener las máximas corrientes y voltajes de potencia a través del modelo eléctrico de paneles fotovoltaicos. Esto permite encontrar la relación entre el espaciamiento de los paneles fotovoltaicos y su temperatura teniendo en cuenta la ventilación por

convección natural, ya que estos son factores que afectan directamente la eficiencia eléctrica del arreglo fotovoltaico (Neill et al., 2018).

Es evidente que la temperatura es un aspecto importante en la producción de energía. De manera que, si se analiza a nivel nacional (Ecuador) se encuentra con una diversidad de climas que se influyen por su topografía. La ubicación del Ecuador en la línea ecuatorial hace que la estacionalidad sea mínima durante todo el año. Sólo hay dos estaciones claramente definidas: el verano seco y el invierno lluvioso. La duración de las estaciones varía de un lugar a otro. En la región de la Costa, la estación seca dura de junio a noviembre, mientras que la lluviosa va de diciembre a mayo. Los Andes tienen dos estaciones bien diferenciadas: una húmeda, de octubre a mayo, y otra seca, de junio a septiembre. El norte y el sur de la zona amazónica difieren entre sí. La estación húmeda en el norte de la Amazonia dura de marzo a noviembre, mientras que la seca va de diciembre a febrero. El ciclo estacional en el resto de la Amazonia es comparable a la andina (Cortés Cortés et al., 2020).

Dado la diversidad de climas que presenta el Ecuador, es necesario analizar los efectos térmicos en paneles solares mediante las ecuaciones de Navier Stokes para disminuir las pérdidas de producción de energía considerando diferentes condiciones climáticas estacionarias.



# **CAPÍTULO I**

## **ASPECTOS GENERALES**

### **1.1. Planteamiento del problema**

Debido a que el Ecuador cuenta con una diversidad de climas que se influyen por su topografía, es necesario considerar las condiciones climáticas estacionarias para el análisis de efectos térmicos en la producción solar fotovoltaica.

Es así como, para lograr una producción óptima de energía, se debe analizar la temperatura de los equipos eléctricos sensibles inmersos en este proceso para no afectar su eficiencia. Este es el caso de los paneles fotovoltaicos, puesto que, la temperatura tiene una repercusión importante sobre el voltaje, corriente y potencia, así como, en su eficiencia. De manera que, para el estudio de los efectos térmicos que se suscitan en los paneles solares, se debe modelar de forma matemática mediante ecuaciones que gobiernen el comportamiento térmico deseado. En este contexto, los efectos térmicos se relacionan de forma estrecha con la "conservación de la masa", la "segunda ley de Newton" y la "conservación de la energía". Las expresiones que incluyen estos tres parámetros son las ecuaciones de Navier Stokes, mismas que se usan para simular el comportamiento de flujos incomprensibles en estado estacionario.

### **1.2. Justificación**

Existen tres generaciones de células solares. La primera generación son las células solares de silicio (Si), que consisten en monocristales y policristales. La segunda generación son las células solares de película delgada y la tercera generación son las células solares sensibilizadas por colorante (Tawheed Kibria et al., 2014). En este contexto, la primera generación es la célula solar más utilizada y tiene la mayor eficiencia. La eficiencia de las células solares de silicio es de alrededor del 14-20%

(Teo et al., 2012). (Kenu E. Sarah, 2020) realizó un estudio exhaustivo de los tipos de células solares y los enfoques para mantener su rendimiento. Por consiguientes, se evidenció que el rendimiento de las células solares se ve afectado por la radiación solar y la temperatura de funcionamiento. La temperatura de funcionamiento de las células solares puede alcanzar los 88 °C a una intensidad solar de 1000 W/m<sup>2</sup>. Las temperaturas de trabajo excesivas de las células solares pueden causar una disminución en su rendimiento. Cada aumento de 1 °C por encima de la temperatura de trabajo de la célula solar provoca una disminución del 0,4% en la eficiencia (Houssamo et al., 2010).

### **1.3. Delimitación**

La solución de las ecuaciones de Navier Stokes es posible usando el software Autodesk CFD, que resuelve las ecuaciones mencionadas mediante métodos analíticos aproximados. Además, este permite modelar gráficamente los resultados obtenidos. Estos resultados serán la entrada para el modelo eléctrico del panel solar con el fin de calcular la energía producida por el sistema solar y su eficiencia. Para lo cual, el modelado eléctrico del panel fotovoltaico se basa en su modelo eléctrico equivalente, que consta de una fuente de corriente en paralelo con un diodo de características casi ideales. Este proceso se repetirá bajo diversas condiciones de estudio, es decir se plantea la variación de parámetros como la distancia, disposición e inclinación de los paneles solares. Por último, los softwares de utilidad para este estudio son, Autodesk CFD para el análisis térmico y MATLAB para el análisis eléctrico.

Por lo antes expuesto, es evidente que existen parámetros que afectan de forma significativa a la generación de energía. De manera que, para que este estudio sea objetivo se considera tres locaciones (temperatura alta, media y baja) a nivel nacional.

Para la selección de estos lugares se elige provincias de forma aleatoria y se las compara con base en la potencia que genera en 24 horas.

#### **1.4. Objetivo general**

Analizar los efectos térmicos en paneles solares mediante las ecuaciones de Navier Stokes para disminuir las pérdidas de producción de energía considerando diferentes condiciones climáticas estacionarias.

##### **1.4.1. Objetivos específicos**

- Modelar el comportamiento térmico de una celda solar mediante las ecuaciones de Navier Stokes para la descripción de su comportamiento de forma matemática.
- Calcular la producción de energía eléctrica mediante el modelo eléctrico solar equivalente para la obtención de la eficiencia del sistema.
- Establecer varios escenarios de prueba con diferentes niveles de temperatura para la comparación del comportamiento mecánico y eléctrico.

#### **1.5. Hipótesis**

La modelación del comportamiento térmico de un panel solar mediante las ecuaciones de Navier Stokes permitirá la evaluación de los efectos térmicos considerando diferentes condiciones climáticas estacionarias en la producción de energía.

## **1.6. Tipo de investigación y metodología**

El tipo de metodología de la investigación que se utilizará para la elaboración del presente proyecto será la cuantitativa que de acuerdo con lo que indica Suárez y Cortez (2018) el diseño de la investigación cuantitativa constituye el método experimental común de la mayoría de las disciplinas científicas. El objetivo de una investigación cuantitativa es adquirir conocimientos fundamentales y la elección del modelo más adecuado que nos permita conocer la realidad de una manera más imparcial, ya que se recogen y analizan los datos a través de los conceptos y variables medibles. La investigación cuantitativa es una forma estructurada de recopilar y analizar datos obtenidos de distintas fuentes, lo que implica el uso de herramientas informáticas, estadísticas, y matemáticas para obtener resultados.

Las características de este enfoque de investigación según Hernández et al. (2014) indica que el enfoque cuantitativo (que representa, como se dijo, un conjunto de procesos) es secuencial y probatorio. Cada etapa precede a la siguiente y no se puede eludir pasos.

El orden es riguroso, aunque desde luego, se puede redefinir alguna fase. Parte de una idea que va acotándose y, una vez delimitada, se derivan objetivos y preguntas de investigación, se revisa la literatura y se construye un marco o una perspectiva teórica. De las preguntas se establecen hipótesis y determinan variables; se traza un plan para probarlas (diseño); se miden las variables en un determinado contexto; se analizan las mediciones obtenidas y se extrae una serie de conclusiones.

## **CAPÍTULO II FUNDAMENTACION TEÓRICA**

### **2.1. Estado del arte**

A continuación, se muestra una descripción general de los estudios que son más relevantes y similares al estudio actual. El artículo propuesto por Kazem (2019) presenta una investigación sobre el enfriamiento de paneles fotovoltaicos utilizando agua para este propósito, que luego se utiliza para las necesidades del hogar en lugar de usar calentadores de agua convencionales. El análisis térmico y eléctrico se realiza sobre la base de las medidas tomadas del circuito en el campo, luego estos resultados se comparan con las ecuaciones de voltaje en vacío, corriente de cortocircuito, potencia y eficiencia, mostrando que el uso del agua como un medio de refrigeración y su uso posterior en las tareas domésticas es eficaz, porque la potencia del panel fotovoltaico se mantiene en el nivel nominal incluso en condiciones de máxima irradiancia.

El estudio técnico expuesto por Dutra Silva et al. (2019) desarrolla un análisis experimental de un sistema fotovoltaico de espejo con seguimiento solar, el cual utiliza radiación directa y radiación difusa. El estudio se centró en el análisis térmico porque los espejos solares aumentan la energía eléctrica que se recolecta de las células fotovoltaicas, pero pueden provocar un aumento significativo de la temperatura. Es así como, sobre la base de mediciones tomadas durante un período de tiempo, se confirma que la temperatura del panel solar aumenta a razón de 5°C. Esto se debe al uso de un espejo que rastrea la luz solar y también la energía recibida. Además, se revela que la temperatura del panel solar alcanza el límite máximo establecido por el fabricante, lo que significa que se requiere un enfriamiento forzado.

La investigación desarrollado por Sarafraz et al. (2019) expone un estudio experimental que evalúa los efectos térmicos y eléctricos de una lámina fotovoltaica. El sistema fotovoltaico se enfría por paredes de nanotubos de carbono junto con un nano fluido preparado por un homogeneizador ultrasónico para aumentar la tasa de intercambio de calor. Sobre la base de mediciones a gran escala obtenidas durante un cierto período de tiempo, se demuestra que el uso de nanotubos con nanos fluidos aumenta las propiedades eléctricas en un 20 % y las tasas de transferencia de calor en un 130 %.

En el artículo de revisión presentado en Cortés et al. (2020), se considera la pérdida insuficiente causada por diferentes factores. Se establecen los criterios clave para una investigación de la pérdida insuficiente de los sistemas solares fotovoltaicos (SPV), el impacto de los parámetros internos y externos, las pérdidas del sistema y las causas de las pérdidas insuficientes en los sistemas de energía solar. Esto es de utilidad para mejorar los sistemas fotovoltaicos. Además, se presenta una descripción completa de la influencia de los parámetros internos y externos, las pérdidas por desajuste, las causas de las pérdidas por desajuste (radiación solar, temperatura, polvo y humedad relativa), las diferentes conexiones topológicas, los méritos y deméritos del sistema solar fotovoltaico.

En el estudio técnico descrito por Gragnaniello et al. (2022) se presenta una nueva metodología de optimización para su uso específico en un micro canal. El modelo se puede utilizar para un sistema fotovoltaico de concentración cilindro parabólico lineal, enfriado por placas-aletas. La resistencia térmica de las placas-aletas utilizadas también se consideran para sus evaluaciones.

La investigación descrita por Badi et al. (2022) se indaga el efecto de la temperatura en los parámetros de las células fotovoltaicas (PV). Los parámetros de la

celda fotovoltaica, como las resistencias en serie y en paralelo, el factor de idealidad del diodo y la corriente de saturación del diodo, no se consideran en el modelo por pasos informado. En contraste, el estudio pretende mejorar los modelos disponibles utilizados en el modelado y simulación de módulos fotovoltaicos. Todos los parámetros dependientes de la temperatura requeridos se determinan para modelar el módulo fotovoltaico simulado con alta precisión utilizando el software Simulink/MATLAB. Para validar el método, se configura un panel solar de 36 celdas y 50 W con diferentes radios de curvatura para evaluar las salidas de energía solar en diferentes condiciones de temperatura e irradiación. El lugar de estudio es la región de Tabuk (Arabia Saudita) en función de su ubicación y condiciones climáticas. El método proporciona conformidad con las salidas de potencia medidas para condiciones variables de temperatura e irradiación horizontal global (GHI). La salida de potencia máxima del módulo fotovoltaico aumenta de 14,4 W a 25,8 W cuando la densidad de potencia solar recibida varía de 307 W/m<sup>2</sup> a 526 W/m<sup>2</sup> dependiendo del nivel de curvatura, desde una forma semicilíndrica hasta una forma abovedada y una forma plana. El módulo fotovoltaico curvo muestra una variación de potencia ligeramente mayor con la temperatura en comparación con el plano. Por encima de 25 °C, la potencia de salida es aproximadamente un 20 % menor a una temperatura máxima de 65 °C. Cuando la temperatura desciende por debajo de los 25 °C, la potencia de salida aumenta aproximadamente un 6 % y un 11,5 % para temperaturas correspondientes de 15 °C y 5 °C, respectivamente.

En el artículo presentado por Khaki et al. (2017) se adopta el algoritmo genético (GA) para mejorar la energía junto con la exergía (propiedad termodinámica de una sustancia que permite determinar el potencial de trabajo útil de una determinada cantidad de energía) en sistemas BIPV/T. Como resultado, se observaron mayores

eficiencias. Por otro lado, Vera et al., (2014) propuso un modelo matemático y se predijo la eficiencia de un sistema BIPV/T tanto matemática como experimentalmente. En este sentido, se emplea un GA para determinar los mejores parámetros de decisión que influyen en el mecanismo del sistema y el funcionamiento general. Además, se investigan los siguientes parámetros: espacio de aire, relación de aspecto, longitud del colector, número de colectores, tasa de flujo másico del fluido y capacidad del tanque de almacenamiento.

El estudio presentado por Singh et al. (2015) se centró en el uso de GA incorporado con los objetivos de optimización para mejorar la eficiencia general de un sistema PV/T en Nueva Delhi, India, considerando los factores climáticos. Por otro lado, Sohani et al. (2022) se realiza una optimización multiobjetivo de un sistema BIPV/T incorporando el material de cambio de fase (PCM), bajo el clima de Teherán, capital de Irán. La optimización se realizó en términos de energía, medio ambiente y economía. Como resultado, se encontró que el grosor óptimo del PCM para las condiciones de prueba era de 77,2 mm. Además, se emitió anualmente un 17,7 % menos de CO<sub>2</sub> en comparación con el caso base, y se descubrió que el período de recuperación de la energía del sistema era de 3,3 años.

Está bien establecido que la eficiencia fotovoltaica (FV) depende de la temperatura. La temperatura de las matrices fotovoltaicas se ve afectada por factores como la temperatura ambiente y la velocidad del viento. En los últimos años, ha habido un gran interés en estudiar la influencia de los factores mencionados en la temperatura fotovoltaica. Aunque es bien sabido que una temperatura más alta afectará negativamente al rendimiento fotovoltaico, no hay consenso sobre los resultados cuantitativos.



El artículo propuesto por Assareh et al. (2022) analiza la optimización de un sistema fotovoltaico/térmico (FV/T) en diferentes condiciones climáticas. El estudio evalúa las eficiencias energética y exérgicas (propiedad termodinámica de una sustancia que permite determinar el potencial de trabajo útil de una determinada cantidad de energía) del sistema FV/T propuesto y compara dos métodos de algoritmo evolutivo multiobjetivo basado en la descomposición (MOEA/D) y optimización multiobjetivo por enjambre de partículas (MOPSO). El estudio concluye que el método MOEA/D es más eficaz en la optimización del sistema FV/T que el método MOPSO. Además, se determinan las variables de decisión que influyen en las funciones objetivo y se examinan sus variaciones para la optimización. El estudio también analiza los datos de luz solar y la generación de calor y electricidad del sistema FV/T.

El estudio propuesto por Kazemian et al. (2021) se centra en el desarrollo de un modelo predictivo utilizando la metodología de superficie de respuesta (RSM) para optimizar el rendimiento de un sistema térmico fotovoltaico integrado con material de cambio de fase (PVT/PCM). La investigación considera tanto la optimización mono objetivo como la multiobjetivo para diferentes fines. Los resultados muestran que la sensibilidad de la radiación solar sobre los rendimientos energéticos y termodinámicos es mayor que la de otros factores de operación. El autor recomienda valores óptimos de los factores de control para diferentes condiciones de operación. Por otro lado, para la validación del modelo se emplean datos numéricos y experimentales de estudios anteriores. Por último, el estudio concluye que el modelo predictivo tiene una precisión razonable y que los valores óptimos recomendados de los factores de control se encuentran dentro de un rango aceptable. También se proporciona una lista de referencias relacionadas con la optimización de procesos y productos mediante

experimentos diseñados, así como con el uso de materiales de cambio de fase en sistemas fotovoltaicos de gestión térmica.

La investigación propuesta por Ahmadi et al. (2020) analiza el uso de cuatro modelos diferentes de inteligencia artificial (MLP-ANN, RBF-ANN, ANFIS y LSSVM) para predecir las emisiones de CO<sub>2</sub> en una central eléctrica. El estudio explica la estructura y función de cada modelo, cómo se entrenan y optimizan. También se analiza la importancia de ajustar los parámetros y el uso de funciones de núcleo en los modelos. Asimismo, se presenta el desarrollo y la evaluación de estos modelos para modelizar la eficiencia de un sistema fotovoltaico-térmico (FV/T). Los modelos fueron entrenados y probados utilizando datos recogidos de una instalación FV/T a escala de laboratorio. El modelo LSSVM resultó ser el más preciso, con una menor desviación de los valores experimentales en comparación con otros modelos. Para la evaluación de los modelos se utilizan criterios estadísticos como el error cuadrático medio, la desviación media relativa, la desviación estándar, el error cuadrático medio y el coeficiente de correlación.

El estudio propuesto por Liu et al. (2021) expone un novedoso sistema de acoplamiento para el aprovechamiento de la energía solar que combina un subsistema fotovoltaico/térmico y un ciclo orgánico de Rankine (ORC) accionado por un colector solar cilindro-parabólico (CCP). El estudio analiza y optimiza el sistema utilizando el software TRNSYS, seleccionando como variable de optimización la relación de área entre el panel fotovoltaico y el colector cilindro-parabólico. El rendimiento del sistema de acoplamiento se compara con dos sistemas independientes (PV/T y sistema ORC), y la ratio de calentamiento eléctrico, así como, la eficiencia de utilización de la energía solar se aprovecha como principales parámetros de comparación. Los resultados muestran que el sistema de acoplamiento es más fiable y tiene la mayor energía total

de salida (calor y electricidad), con un aumento del 40% en la eficiencia de utilización de la energía solar en comparación con los sistemas independientes. El estudio también analiza los retos y oportunidades asociados a las distintas tecnologías y políticas de energía solar y proporciona información sobre su evaluación y optimización del rendimiento.

El estudio propuesto por Prakash, (2022) analiza la variación del ángulo acimutal y la inclinación del panel solar en función de la potencia media de salida solar. Se analiza la variación horaria del ángulo acimutal y la inclinación del panel solar en paneles solares operados con sistema de seguimiento de eje vertical y eje horizontal durante todo un año. El análisis de los diferentes parámetros en el sistema de seguimiento se lleva a cabo utilizando el software HOMER. También se analizan los diferentes casos sensibles como la reflectancia solar y la inclinación del panel solar que tienen un impacto en la producción de energía solar y la capacidad solar.

La investigación descrita por Yfantis, (2017) aborda el problema de la disminución de la eficiencia de los paneles solares debido a la acumulación de suciedad y otros elementos en su superficie. La suciedad, como el polvo, los residuos de aves y la vegetación, puede reducir significativamente la cantidad de luz solar que llega a los paneles, lo que a su vez disminuye la cantidad de energía eléctrica que se puede generar. Para lo cual, el estudio propone un sistema inteligente de robots-servidores para la limpieza de paneles solares y la optimización de la producción de energía eléctrica. El sistema está diseñado para detectar y eliminar vegetación, limpiar los paneles y prevenir daños causados por animales. Además, el estudio resalta la importancia de una limpieza constante para evitar rayas en la superficie de los paneles que inhiben la producción de energía.

El estudio técnico descrito por Deng et al., (2023) desarrolla un modelo bidimensional del proceso de carga en una unidad de almacenamiento de calor en un subsistema de calor latente de tipo carcasa-tubo de una planta de energía solar con generación directa de vapor. Se investigan los efectos de la relación de diámetro exterior a diámetro interior, la relación de aspecto, la conductividad térmica del material de cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés) y la tasa de flujo de masa del fluido de transferencia de calor (HTF, por sus siglas en inglés). Como conclusión, se determina que aumentar la conductividad térmica del PCM, la tasa de flujo de masa del HTF y la relación de aspecto de la unidad de almacenamiento de calor puede reducir el tiempo de almacenamiento de calor.

El estudio técnico descrito por E. S. dos Santos et al., (2022) propone un enfoque novedoso para optimizar el despacho económico de cargas y emisiones combinadas (CEED) en generadores térmicos. Para lograrlo, el estudio emplea algoritmos metaheurísticos, incluyendo la optimización por enjambre de partículas (PSO), la optimización por león hormiga (ALO), el algoritmo libélula (DA) y la evolución diferencial (DE). Estos algoritmos se utilizan habitualmente para simulaciones comparativas y evaluación de la optimización CEED, que se generan en MATLAB. El estudio introduce un nuevo método que identifica y desactiva los generadores térmicos menos eficientes. Al hacerlo, las técnicas metaheurísticas pueden determinar el valor óptimo de potencia de los generadores restantes, lo que conduce a una reducción de los contaminantes atmosféricos.

La investigación expuesta por Hocine et al., (2019) utiliza un modelo analítico basado en las soluciones de las ecuaciones de calor para determinar los campos de temperatura de un panel solar en modo de polarización inversa, con el fin de seleccionar y predecir los puntos calientes esperados y de riesgo. Se observa que cada

celda unitaria sombreada es capaz de generar por sí sola una cantidad de calor, la cual debe ser eliminada eficientemente para anticipar cualquier proceso de falla. El estudio ayuda a seleccionar y localizar los puntos calientes esperados en el panel sombreado y resalta la necesidad de un estudio térmico previo al diseño para minimizar la disipación térmica a nivel del sistema.

El estudio expuesto por Dev et al., (2022) se centra en mejorar el rendimiento global de los paneles fotovoltaicos (FV) abordando el problema de la temperatura de funcionamiento, que puede influir negativamente en la absorción de la radiación solar. Para lograrlo, los investigadores diseñaron y fabricaron internamente un sistema híbrido fotovoltaico/térmico (PV/T) que se estudió paramétricamente para aplicaciones prácticas. El sistema utilizaba agua y nanofluidos a base de agua para la refrigeración activa, y los investigadores también estudiaron el efecto del material de cambio de fase (PCM) en combinación con la refrigeración activa. Se diseñaron nanofluidos estables a base de agua de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{TiO}_2$  con dos concentraciones diferentes de nanopartículas de 0,05 y 0,1 vol.%, y se midieron y analizaron experimentalmente su conductividad térmica y estabilidad. Los resultados mostraron que la conductividad térmica de los nanofluidos aumentaba con la concentración de nanopartículas en el fluido base, con una mejora máxima de alrededor del 30% observada con el nanofluido  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -agua a una concentración de 0,1 vol.%. El sistema FV/T se simuló experimentalmente en una instalación interior con un simulador solar, y los investigadores descubrieron que la disminución máxima de la temperatura del panel era de alrededor del 25% utilizando simultáneamente refrigeración activa y pasiva, lo que se traducía en una mejora de la eficiencia eléctrica de aproximadamente el 10,3% a 1050 W/m<sup>2</sup>. El uso de nanofluidos también mejoró la eficiencia térmica del sistema en comparación con el agua, con una mejora máxima de alrededor del 10%

conseguida con el nanofluido Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-agua a una concentración del 0,1 % vol. Estos resultados son importantes para la aplicación práctica de los sistemas FV/T.

## **2.2. Visión general**

El uso de combustibles fósiles en todo el mundo ha provocado el molesto calentamiento global, que afecta significativamente a nuestra salud, medio ambiente y clima. Se ha hecho mucho hincapié en la implantación de fuentes de energía renovables. La energía solar es sin duda la forma más abundante de energía renovable.

La energía solar es una importante fuente de energía renovable, y sus métodos se clasifican en solares pasivos o activos en función de cómo captan y distribuyen la energía solar o la convierten en energía solar. Los sistemas fotovoltaicos, la energía solar concentrada y el calentamiento solar del agua son ejemplos de métodos solares activos que pueden utilizarse para captar energía. Orientar una estructura hacia el Sol, seleccionar materiales con masa térmica favorable o cualidades de dispersión de la luz, y diseñar estancias por las que circule el aire de forma natural son ejemplos de métodos solares pasivos. A menudo se considera preferible a otras fuentes de energía alternativas por sus favorables características medioambientales y de seguridad, aunque los costes sean ligeramente superiores. Para la captación de energía solar térmica de baja temperatura, el colector solar plano es muy utilizado hoy en día. La energía solar tiene el mayor potencial de todas las fuentes de energía renovables, sobre todo cuando otras fuentes del país se han agotado. El sol es una esfera de materia gaseosa extremadamente caliente de  $1,39 \times 10^9$  m de diámetro. La temperatura efectiva del cuerpo negro del sol es de 5800 K. La energía solar llega a nuestro planeta sólo 8 minutos y 20 segundos después de salir del enorme horno. La Tierra sólo intercepta una minúscula parte de la radiación total liberada, que oscila entre 1,7 kW y 1014 kW.

Incluso con esta pequeña fracción, se prevé que 30 minutos de radiación solar que cae sobre la Tierra equivalen a las necesidades energéticas mundiales de un año. Esta tecnología es beneficiosa para el medio ambiente.

El módulo fotovoltaico (PV) es uno de los productos más útiles, sostenibles y no nocivos en el campo de las energías renovables. Además, este ofrece tiempos de servicio más largos con un coste de mantenimiento mínimo. Los elementos fotovoltaicos son resistentes, sencillos de diseñar y su construcción como sistema autónomo proporciona desde micro potencia hasta mega potencia. El nivel de irradiación es la causa principal de la generación de energía fotovoltaica. Por lo tanto, el efecto de la irradiación es significativo para mejorar la eficiencia del módulo fotovoltaico. El caudal de fluido y la temperatura ambiente desempeñan un papel importante en la eficiencia fotovoltaica. El sombreado parcial de un módulo fotovoltaico tiene un impacto inconsistente en la producción de energía.

Los investigadores se enfrentan con frecuencia a la circulación de fluidos y la transferencia de calor en colectores solares con distintas orientaciones. Existen algunas soluciones analíticas y numéricas de gran envergadura para estos problemas clásicos. Sin embargo, los elementos utilizados en aplicaciones prácticas tienen un diseño mucho más intrincado, y predecir su rendimiento basándose en una geometría simple conduce a un error importante. Debido a esta complejidad, en los últimos años los investigadores han estudiado las características térmicas de formas geométricas complicadas de colectores solares. La mayoría de los modelos matemáticos utilizados para predecir el flujo y el comportamiento térmico implican un sistema de ecuaciones diferenciales parciales no lineales acopladas, excepto en unos pocos casos, en los que no se dispone de una solución analítica.

### **2.3. Transferencia de calor**

La generación, utilización, conversión e intercambio de energía térmica (calor) a través de sistemas físicos es el tema de la transferencia de calor, que es una rama de la ingeniería térmica. Los tres métodos principales de transmisión de calor son la conducción, la convección y la radiación. La conducción es el transporte de calor a través de interacciones mutuas entre átomos vibrantes cuyas posiciones medias permanecen inalteradas. Los sólidos son el principal medio para este tipo de transferencia. La convección es el transporte de calor de un lugar a otro mediante la movilidad de átomos, moléculas o grupos de moléculas. En los líquidos y los gases se produce la transferencia por convección. La radiación es la transferencia de calor de un lugar a otro en forma de fotones de radiación electromagnética con longitudes de onda superiores a  $10.000\text{Å}$ . El uso de varias ecuaciones revela que los líquidos tienen conductividades más bajas que los sólidos en general. El cálculo del flujo de calor en las relaciones gas-sólido se complica por la consideración matemática de la transferencia de calor por convección. El calor se mueve a través de un material granular, material poroso o lechos de sólidos fracturados utilizando una mezcla de conductividad a través y entre partículas sólidas, así como radiación y convección a través de huecos, y cualquier intento de estimar la conductividad mediante experimentos da como resultado una conductividad agregada. La tabla 1.1 muestra la diferencia entre conducción, convección y radiación.

### **2.4. Inspección eléctrica de sistemas fotovoltaicos**

Para realizar un análisis eléctrico de celdas fotovoltaicas se necesita conocer conceptos propios de la tecnología, entre los que se encuentran la corriente de cortocircuito, tensión de circuito abierto, factor de llenado y la eficiencia del panel fotovoltaico.



## 2.5. Onda característica corriente-voltaje

La ecuación (1) permite cuantificar la corriente de cortocircuito.

$$I_{SC} = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] - I_L \quad (1)$$

$I_{SC}$ : Esta es la corriente de cortocircuito (short-circuit current). Representa la corriente máxima que fluye a través de un dispositivo o sistema cuando se conectan los terminales de salida directamente, lo que resulta en una caída de tensión nula. Es importante en el diseño y análisis de sistemas fotovoltaicos, donde representa la corriente máxima generada por un panel solar en condiciones de cortocircuito.

$I_0$ : Este término representa la corriente de saturación inversa (reverse saturation current en inglés) de un dispositivo semiconductor, como un diodo. Es la corriente que fluye a través del dispositivo cuando está polarizado inversamente y es independiente de la tensión aplicada. Es una característica importante en la modelización de dispositivos semiconductores y está relacionada con los procesos de recombinación de portadores en la unión PN del diodo.

$q$ : Es la carga elemental, la carga del electrón, que tiene un valor aproximado de  $1.6 \times 10^{-19}$  culombios. Es una constante fundamental de la naturaleza y es crucial en las ecuaciones que involucran cargas eléctricas y fenómenos relacionados.

$V$ : Representa el voltaje a través del dispositivo o sistema en estudio. En el contexto de la ecuación, podría referirse a la tensión en la unión PN de un diodo, por ejemplo.

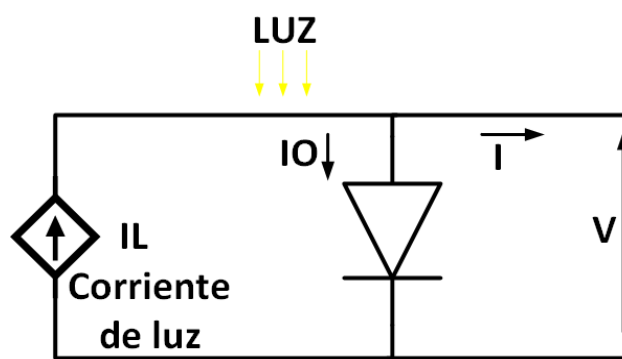
$n$ : Es el factor de idealidad, también conocido como factor de emisión. Es un parámetro que se utiliza para ajustar la ecuación del diodo ideal a la realidad, considerando los procesos de recombinación y otros fenómenos no ideales en la unión

PN. Su valor típico para un diodo de silicio es aproximadamente 1, pero puede variar dependiendo del tipo de diodo y las condiciones de funcionamiento.

$k$ : Es la constante de Boltzmann, que tiene un valor de aproximadamente  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K, esto quiere decir que equivale aproximadamente  $1.380\ 6488 \times 10^{-23}$  Julios de energía por cada grado Kelvin que tiene un sistema. Esta constante relaciona la energía térmica de un sistema con su temperatura absoluta. Aparece en la ecuación debido a la relación entre la energía térmica y la probabilidad de ocurrencia de un evento, como la emisión de portadores en un diodo.

$T$ : Representa la temperatura absoluta del sistema en Kelvin. Es un parámetro importante en la ecuación ya que influye en la energía térmica disponible para los portadores y, por lo tanto, en la corriente generada.

$I_L$ : Este término representa la corriente de carga (load current en inglés) que fluye a través del dispositivo o sistema en estudio cuando está conectado a una carga externa. Es importante tener en cuenta esta corriente cuando se analiza el funcionamiento de un dispositivo o sistema bajo carga real. Además, el esquema del circuito que ilustra la ecuación 1 se muestra a continuación.



**Figura 1** Modelación de luz sobre unión semiconductor P  
**Fuente:** Autora

La unión P de un diodo es una de las dos regiones semiconductoras presentes en este dispositivo electrónico. Un diodo es un componente semiconductor que permite

que la corriente eléctrica fluya en una dirección específica y bloquea el flujo en la dirección opuesta. Está compuesto principalmente por dos regiones semiconductoras diferentes, la unión P y la unión N.

La ecuación (2) representa la curva I-V de un dispositivo o sistema eléctrico, y su formulación se basa en parámetros específicos que describen el comportamiento de la corriente en función de la tensión aplicada. En esta ecuación,  $I$  representa la corriente en el primer cuadrante,  $I_L$  denota la corriente de carga externa que fluye a través del dispositivo o sistema, mientras que  $I_0$  es la corriente de saturación inversa característica de un dispositivo semiconductor.

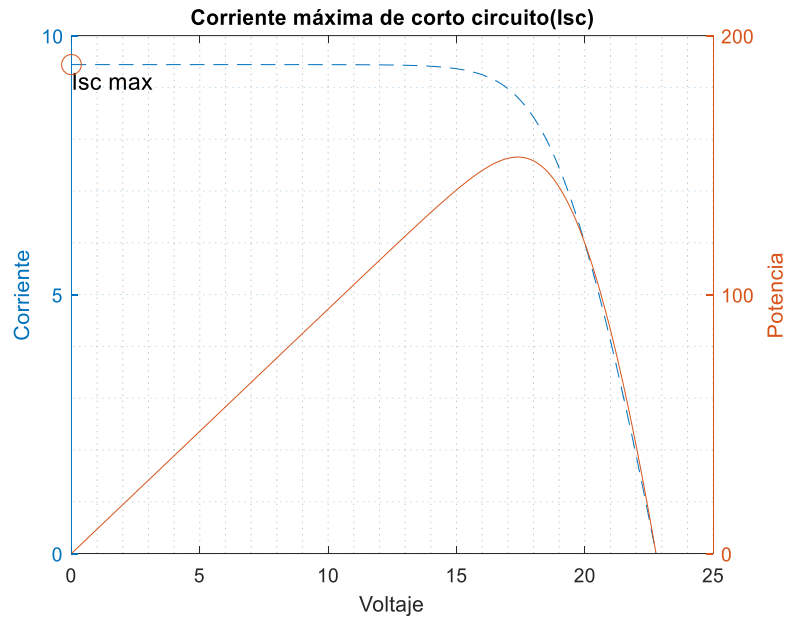
$$I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

Como la exponencial suele ser mayor que 1, exceptuando valores por debajo de 100 mV, se puede eliminar la parte -1. Como la corriente producida por la luz,  $I_L$ , domina cuando hay voltajes bajos, la ecuación se simplificaría (Maatallah & Youssef, 2019).

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \right] \quad (3)$$

## 2.6. Corriente de cortocircuito

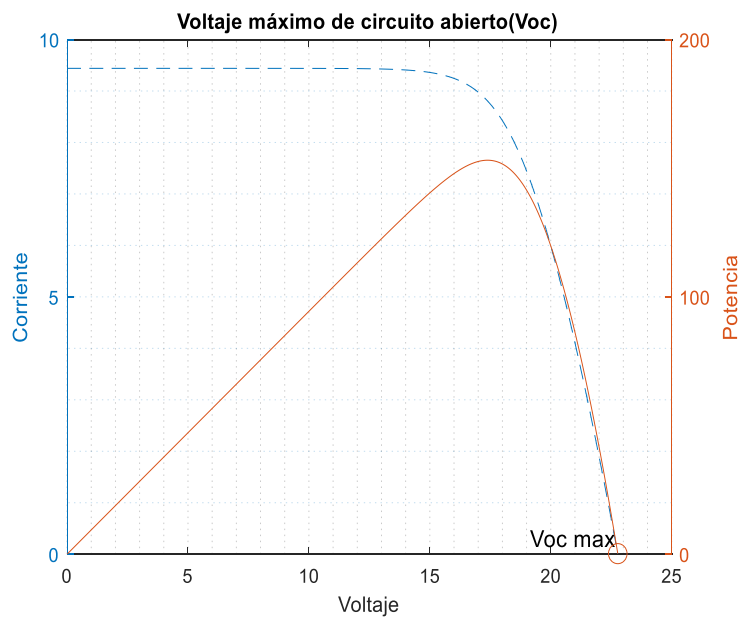
Según la Figura 2, la corriente de cortocircuito ( $I_S$ ) es el valor más alto que puede obtenerse de la célula solar. Las siguientes variables afectan a la  $I_{SC}$ : la superficie del panel solar, una medida del recuento de fotones, el espectro de color de la luz en el momento del impacto, la probabilidad de captación, las características de reflexión y absorción en óptica.



**Figura 2** Comportamiento de corriente máxima de corto circuito  
**Fuente:** La autora

### 2.7.Voltaje de circuito abierto

Cuando la corriente de cortocircuito es cero, el voltaje en circuito abierto ( $V_{oc}$ ) alcanza su magnitud máxima en la célula solar (Ömeroğlu, 2018) (Augusto et al., 2017). El punto de máximo voltaje se representa en la Figura 3.



**Figura 3** Comportamiento de voltaje máximo en circuito abierto  
**Fuente:** La autora

La ecuación 4 describe el  $V_{oc}$  en el caso donde la corriente de cortocircuito sea igual a 0.

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (4)$$

En este sentido,  $I_0$  se relaciona con la corriente de saturación oscura del diodo ( $1 \times 10^{-10}$  A).  $I_L$  corresponde a la corriente que produce la luz (0,5 A). El parámetro de idealidad ( $n$ ) tiene un valor de 1.  $T$  pertenece a la temperatura (en grados Kelvin) determinada por la simulación CFD (dinámica de fluidos computacional) de Autodesk. Asimismo, la tensión en circuito abierto es  $V_{oc}$  (V).

La ecuación (5) describe como el voltaje de circuito abierto puede ser escrito como una función de la concentración de portadores (Feijoo et al., 2019)(Kant et al., 2019).

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{(N_A + \Delta_n)\Delta_n}{n_i^2}\right) \quad (5)$$

Con referencia a la ecuación 5,  $N_A$  se asocia a la concentración de dopaje. Por otro lado, el exceso de concentración de portadores se representa con  $\Delta_n$ . Asimismo,  $T$  es la temperatura (en grados Kelvin) determinada por la simulación CFD de Autodesk. Por último, la concentración intrínseca de portadores se denota por  $n_i$ .

## 2.8. Potencia en celdas solares

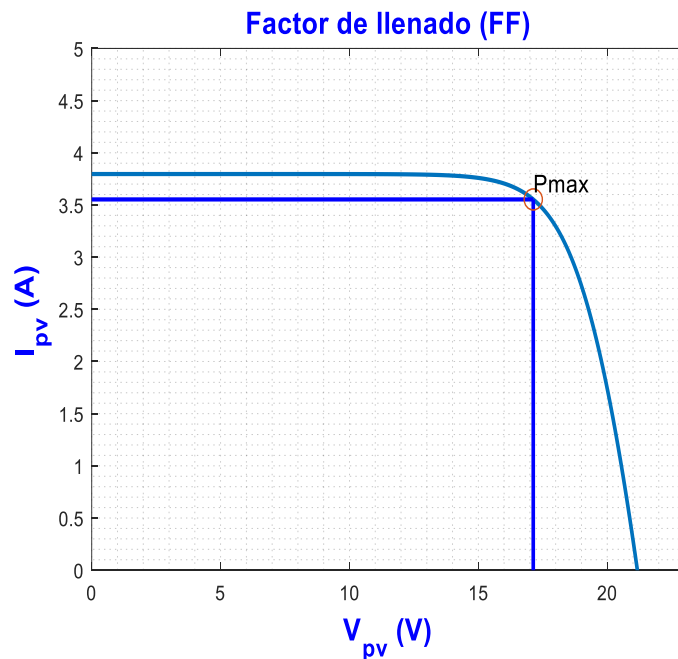
La potencia del panel fotovoltaico se obtiene del producto de la corriente de cortocircuito y el voltaje en vacío, lo cual se describe mediante la Ecuación (6) (Ahmadi et al., 2018).

$$P_{out} = I_{MAX} * V_{MAX} \quad (6)$$

$P_{out}$  es la potencia de salida del panel solar (W).  $I_{MAX}$  es la corriente a la capacidad máxima del panel solar (A).  $V_{MAX}$  es la tensión a la máxima potencia del panel solar (V).

## 2.9. Factor de llenado

El factor de llenado (FF) es un parámetro que indica la capacidad máxima que puede absorber una celda solar (Figura 4). El producto de la corriente y el voltaje máximos deben ser la potencia máxima, pero el resultado es cero. Por lo tanto, el ciclo de trabajo se define como la relación de potencia máxima entre  $V_{OC}$  e  $I_{SC}$  (F. da R. Santos et al., 2019)(Hages et al., 2016).



**Figura 4** Punto de máxima potencia  
Fuente: La autora

Dado que el ciclo de trabajo es una medida cuadrática de la curva I-V, una celda solar con un voltaje más alto tendrá un ciclo de trabajo más alto ya que la curva I-V ocupa menos espacio (Sun et al., 2016). El valor máximo del factor de trabajo

descrito por la derivada parcial de la potencia de la celda solar con respecto al voltaje cero se presenta en la ecuación (7).

$$\frac{d(IV)}{dV} = 0 \quad (7)$$

## 2.10. Ecuaciones de Navier-Stokes

Formuladas y estudiadas intensamente a principios del siglo XIX, las ecuaciones diferenciales parciales clásicas de la física matemática representan la base de nuestro conocimiento de las ondas, la conducción del calor, la hidrodinámica y otros problemas físicos. Su estudio impulsó el trabajo posterior de investigadores matemáticos y, a su vez, se benefició de la aplicación de nuevos métodos en matemáticas puras. Se trata de un tema muy amplio, íntimamente relacionado con varias ciencias, como la Física, la Mecánica, la Química y las Ciencias de la Ingeniería, con un número considerable de aplicaciones a problemas industriales (Güemes et al., 2021).

Aunque la teoría de las ecuaciones diferenciales parciales ha experimentado un gran desarrollo en el siglo XX, algunas cuestiones fundamentales siguen sin resolverse. Se refieren esencialmente a la existencia global y la unicidad de las soluciones, así como a su comportamiento asintótico (Jubayer et al., 2016).

Desde un punto de vista matemático, una de las cuestiones pendientes más intrigantes en relación con las ecuaciones de Navier-Stokes y estrechamente relacionada con los fenómenos de turbulencia es la regularidad y unicidad de las soluciones al problema del valor inicial (Castillo, 2016).

Las ecuaciones de Navier-Stokes que gobiernan la evolución temporal de la velocidad  $v(t, x) = (v_1(t, x), v_2(t, x), v_3(t, x))$  y la presión  $p(t, x)$  de un fluido viscoso incompresible (cuyo coeficiente de viscosidad viene dado por la constante positiva  $\nu$ ) fluyendo todo  $\mathbb{R}^3$  y en presencia de una fuerza externa  $\varphi(t, x)$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial v}{\partial x} - \nu \Delta v = -(v * \nabla)u - \nabla p + \phi \\ \nabla * u = 0 \\ v(0) = v_0 \quad x \in \mathbb{R}^3, t \geq 0 \end{array} \right\} \quad (8)$$

Aquí, la fuerza externa  $\phi(t, x)$  se surge de un potencial  $V(t, x)$  de tal manera que

$$\phi = \nabla * V \quad (9)$$

Lo que significa que.

$$\phi_j = \sum_{k=1}^3 \partial_k * V_{kj} \quad j = 1, 2 \text{ y } 3 \quad (10)$$

La viscosidad  $\nu$  se asume igual a uno. Esto puede hacerse sin pérdida de generalidad debido a la estructura invariante de las ecuaciones de Navier-Stokes. Finalmente, gracias a la propiedad de divergencia cero ( $\nabla v = \mathbf{0}$ ), que expresa la incompresibilidad del fluido, se puede escribir  $(v * \nabla)u = \nabla * (u \times u)$ . Esta observación es importante porque el producto de dos distribuciones templadas no siempre está definido, mientras que siempre es posible tomar la derivada (en el sentido de distribuciones) de una función  $L^1_{loc}$ . Por lo tanto, será suficiente que  $v \in L^2_{loc}$  para que el término cuadrático  $\nabla * (u \times u)$  esté bien definido.

Aquí y en lo sucesivo, un vector  $a = (a_1, a_2, a_3)$  se dice que pertenece a un espacio de funciones  $X$  si se cumple que  $a_j \in X$  para todos  $j = 1, 2 \text{ y } 3$  y se define  $\|a\| = \max_{1 < j < 3} (\|a_j\|)$  (Ohkitani, 2017).

En esta explicación, se abordan conceptos relacionados con la mecánica de fluidos y el análisis matemático. La viscosidad  $\nu$  se toma igual a uno, lo que es una suposición común y útil en algunos análisis, ya que la elección de la viscosidad no afecta la estructura general de las ecuaciones de Navier-Stokes, que describen el comportamiento de los fluidos. La propiedad de divergencia cero ( $\nabla v = \mathbf{0}$ ) es relevante para los fluidos incompresibles, donde la divergencia del campo de



velocidades es nula, lo que implica que no hay fuentes ni sumideros locales de fluido. Esto conduce a la expresión  $(v * \nabla)u = \nabla * (u \times u)$ , que relaciona términos importantes en el estudio de los fluidos.

Se menciona la importancia de que el producto de dos distribuciones templadas no siempre está bien definido, mientras que la toma de derivadas (en el sentido de distribuciones) es más manejable. Además, se establece que la función  $v$  debe pertenecer al espacio  $L^2_{loc}$  para que el término  $\nabla * (u \times u)$  tenga un significado claro y esté bien definido.

La última parte de la explicación introduce el concepto de un vector en un espacio de funciones y define la norma  $\|a\|$  como la máxima norma de sus componentes.

### **2.11. Transferencia de calor**

La transferencia de calor es el tema que aborda la generación, utilización, conversión e intercambio de energía térmica (calor) a través de sistemas físicos, y es una rama de la ingeniería térmica. Los tres principales métodos de transmisión de calor son la conducción, la convección y la radiación. La conducción es el transporte de calor a través de interacciones mutuas entre átomos vibrantes cuyas posiciones medias permanecen inalteradas, y los sólidos son el principal medio para este tipo de transferencia. La convección, en cambio, es el transporte de calor de un lugar a otro mediante la movilidad de átomos, moléculas o grupos de moléculas, y en los líquidos y gases se produce la transferencia convectiva. La radiación es la transferencia de calor de un lugar a otro en forma de fotones de radiación electromagnética con longitudes de onda superiores a 10.000 Å.

El uso de varias ecuaciones revela que los líquidos, en general, tienen conductividades más bajas que los sólidos. El cálculo del flujo de calor en las relaciones gas-sólido se complica por la consideración matemática de la transferencia de calor por convección. Cuando el calor se mueve a través de un material granular, material poroso o lechos de sólidos fracturados, se utiliza una mezcla de conductividad a través y entre partículas sólidas, así como radiación y convección a través de huecos. Cualquier intento de estimar la conductividad mediante experimentos da como resultado una conductividad agregada. En la Tabla 1 se muestra la diferencia entre conducción, convección y radiación.

**Tabla 1.** Diferencia entre conducción, convección y radiación.

<b>Conducción</b>	<b>Convección</b>	<b>Radiación</b>
El calor se transfiere entre objetos por contacto directo para la conducción.	La transmisión de calor se produce en el interior del fluido por convección.	En la radiación, el calor se transfiere a través de ondas electromagnéticas sin utilizar partículas.
La transmisión de calor se produce por diferencia de temperatura.	La transmisión de calor se debe a la diferencia de densidad.	Todos los objetos con una temperatura superior a 0 K producen transferencia de calor.
La transferencia de calor por conducción es lenta	La transmisión de calor es más rápida por convección.	La transferencia de calor por radiación es la más rápida.
El calor se transfiere por un objeto sólido calentado	El calor se transmite mediante objetos intermedios. Por ejemplo, la transferencia de calor entre el aire y el agua.	Las ondas electromagnéticas se utilizan para transportar calor.
No se le aplica la ley de reflexión y refracción	No se le aplica la ley de la reflexión y la refracción.	Se rige por las leyes de refracción y reflexión.

## **2.12. Energía Solar: Una Fuente Renovable e Inagotable**

La energía solar se genera mediante la conversión de la luz y el calor radiantes del sol en electricidad fotovoltaica o energía térmica solar. Este recurso es abundante y casi ilimitado, lo que la convierte en una opción prometedora para satisfacer la creciente demanda energética global de forma sostenible y garantizar la seguridad energética, al tiempo que se reducen drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero.

A diferencia de los recursos fósiles y nucleares, la energía incidente del sol prevista en la superficie de la Tierra es de unos 885 millones de TWh (Tera watios hora), lo que equivale aproximadamente a 4.200 veces la energía comercial primaria consumida en todo el mundo en 2035 (Xiao & Liu, 2022). A pesar de todas sus ventajas, la energía solar también presenta importantes desventajas, como la falta de disponibilidad durante la noche y la dependencia de la ubicación y el clima. Además, se requieren grandes extensiones de tierra para capturar suficiente energía solar, y la fabricación de colectores solares y equipos asociados puede tener un impacto ambiental negativo.

A pesar de estos inconvenientes, la energía solar sigue siendo una de las fuentes de energía renovable más limpias y efectivas. Entre sus ventajas se encuentran la reducción de la dependencia de combustibles fósiles, la mitigación del cambio climático y la creación de empleos en la industria de la energía renovable. Además, las aplicaciones de la energía solar son diversas, desde la generación de electricidad en hogares y edificios hasta la alimentación de vehículos eléctricos y sistemas de riego agrícola.

En resumen, la energía solar es una fuente de energía renovable y abundante que ofrece una solución prometedora para satisfacer la creciente demanda energética

global. Aunque presenta desventajas, sus ventajas superan con creces cualquier inconveniente y, por lo tanto, se debería seguir investigando y expandiendo su uso.

#### **2.12.1. Beneficios de la energía solar:**

- Es una fuente de energía gratuita que contribuye al ahorro de dinero ya que el sol siempre está presente.
- Es una fuente de energía limpia y libre de contaminación.
- Los paneles solares se utilizan para generar electricidad, no requiere mantenimiento y no tiene una vida útil determinada.
- La energía solar ayuda a reducir la factura eléctrica.
- Las células solares no emiten ruido mientras absorben el calor del sol y generan electricidad.
- Los sistemas de energía solar pueden funcionar sin conexión a la red eléctrica existente y pueden ser incorporados en regiones remotas donde no hay electricidad.
- No produce residuos.

#### **2.12.2. Aplicaciones de la energía solar:**

- Proporcionar calor de proceso en industrias.
- Calefacción y refrigeración de espacios.
- Suministro de agua caliente para cocinas y hogares.
- Desalinización para proveer agua potable en zonas costeras.
- Generación de electricidad limpia y amigable al medio ambiente

#### **2.13. Paneles solares**

Las células solares, también conocidas como sistemas fotovoltaicos, son capaces de convertir la luz solar directamente en energía eléctrica en lugar de calor. El

nombre fotovoltaico proviene del efecto fotovoltaico, que es la transformación de la luz (fotones) en electricidad (voltaje). El descubrimiento de la tecnología fotovoltaica se debe al físico francés Edmond Becquerel en 1839 y fue explicada y establecida como ley del efecto fotoeléctrico por Albert Einstein en 1905. Las células fotovoltaicas están hechas de materiales semiconductores con una unión p-n. Cuando los fotones de la luz solar inciden sobre las células fotovoltaicas, se genera un par electrón-hueco metaestable que dura poco antes de recombinarse. Los portadores de luz generados quedan separados espacialmente por una unión p-n, que al juntarse hace que los electrones y los huecos formen polos tipo n y tipo p, respectivamente, impidiendo así la recombinación. Esto produce una diferencia de potencial, lo que hace que los portadores generados por la luz fluyan a través de un circuito externo, generando energía de corriente continua (CC) (Figura 5).

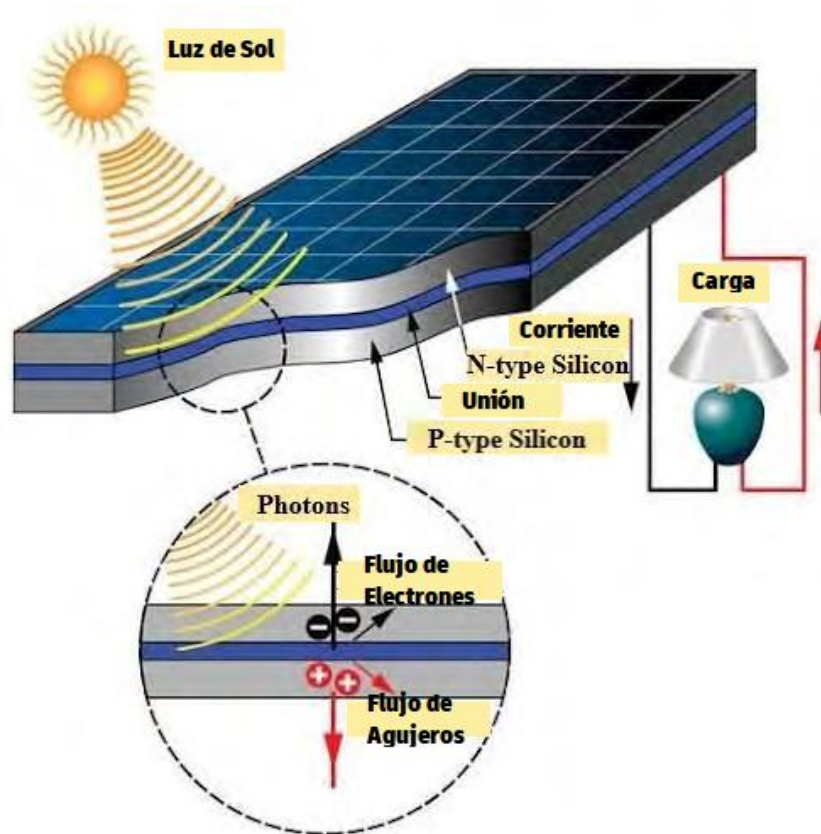
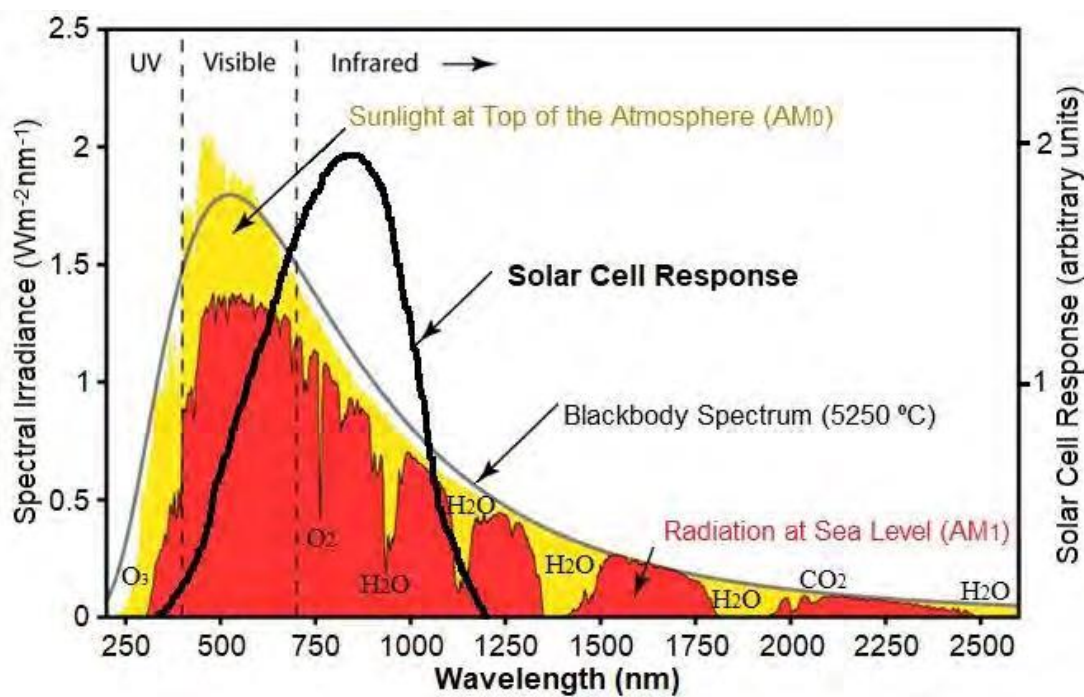


Figura 5 Módulo fotovoltaico  
Fuente: La autora

Los paneles solares (también conocidos como módulos fotovoltaicos) se utilizan en los sistemas de energía fotovoltaica, y cada uno de ellos está formado por un número determinado de células solares que se conectan para producir la cantidad de energía deseada. El espectro solar es una gama de energía electromagnética emitida por el sol, y se compone de radiación electromagnética en tres secciones principales: UV (ultravioleta), visible e infrarrojo (IR). La Figura 6 muestra un espectro típico de radiación solar y la respuesta espectral de una célula solar de silicio. Esta respuesta espectral, también conocida como sensibilidad espectral, determina el rango de radiación en el que la célula es más eficiente y afecta su eficacia en diversas situaciones de radiación.



**Figura 6** Respuesta espectral de una célula solar de silicio y espectro de radiación solar  
**Fuente:** La autora

## **CAPITULO III MODELACIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA**

### **3.1. Metodología para la minimización de pérdida de energía por efectos térmicos.**

El planteamiento para reducir las pérdidas de energía fotovoltaica provocadas por los efectos térmicos se desglosa en dos componentes principales que corresponden al modelo térmico y al modelo eléctrico del sistema, que se analizan en los siguientes subapartados.

### **3.2. Modelo térmico y análisis del sistema mediante CFD.**

La representación de la componente térmica en el contexto de la ecuación de energía de Navier-Stokes es un enfoque crucial en la mecánica de fluidos y la transferencia de calor. Se emplean coordenadas cartesianas debido a su versatilidad y facilidad de implementación en la resolución numérica y analítica de problemas complejos.

La ecuación de energía de Navier-Stokes es una formulación matemática que describe la conservación de la energía en un fluido en movimiento, considerando tanto los efectos viscosos como los términos de transferencia de calor. Esta ecuación es esencial para comprender y predecir el comportamiento térmico y de flujo de diversos sistemas en ingeniería, como la circulación atmosférica, el flujo de fluidos en máquinas y dispositivos, y procesos de transferencia de calor en ingeniería térmica.

Para representar la componente térmica en esta ecuación, se introduce un término adicional que representa la tasa de cambio de la energía térmica del fluido en función del tiempo y de las coordenadas espaciales. La incorporación de este término térmico permite modelar el flujo de calor dentro del fluido y su interacción con los efectos de viscosidad y movimiento.

El uso de coordenadas cartesianas en esta representación se justifica por su simplicidad y conveniencia para describir los sistemas en términos de ejes x, y, y z. Estas coordenadas permiten separar la ecuación de energía en tres componentes, una para cada dirección, lo que facilita el análisis y la implementación numérica en problemas tridimensionales.

La elección de las coordenadas cartesianas también se relaciona con la naturaleza del flujo y la transferencia de calor en muchos problemas prácticos. En aplicaciones ingenieriles, como el diseño de sistemas de refrigeración, análisis de conductos o aerodinámica, los problemas suelen tener geometrías regulares y simétricas que se ajustan bien al sistema de coordenadas cartesianas (Boutina et al., 2018).

$$\begin{aligned} & \rho c \left( \frac{dT}{dt} + v_x \frac{dT}{dx} + v_y \frac{dT}{dy} + v_z \frac{dT}{dz} \right) \\ &= \phi_v + k \left[ \frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{d^2 T}{dz^2} \right] + Q_c + Q_r \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \phi_v = u & \left[ 2 \left( \frac{dv_x}{dx} \right)^2 + 2 \left( \frac{dv_y}{dy} \right)^2 + 2 \left( \frac{dv_z}{dz} \right)^2 + \left( \frac{dv_x}{dy} + \frac{dv_y}{dx} \right)^2 \right. \\ & \left. + \left( \frac{dv_x}{dz} + \frac{dv_z}{dx} \right)^2 + \left( \frac{dv_y}{dz} + \frac{dv_z}{dy} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (12)$$

Los coeficientes de transferencia de calor son  $Q_c$  y  $Q_r$ . Cuando se analiza la temperatura del panel solar, se deduce que se producirán interferencias de calor y fluctuaciones de temperatura a lo largo del eje z (Ming et al., 2016) (Huang et al., 2015). De manera que, la ecuación de la energía se transforma de la siguiente manera:

$$\phi_v + k \left[ \frac{d^2 T}{dz^2} \right] + Q_c + Q_r \quad (13)$$

En este sentido la variable  $\phi_v$  se asocia con

$$\phi_v = u \left[ 2 \left( \frac{dv_z}{dz} \right)^2 \right] \quad (14)$$



Con la suposición que el fluido circula a un cierto ritmo, se tiene que:

$$\begin{aligned} Q &= \int \vec{v} * \vec{n} \, ds \\ \frac{Q}{y} &= \int \vec{v} * \vec{n} \, dz \end{aligned} \quad (15)$$

En consecuencia, el resultado de la operación es:

$$Q = v * n \frac{uh}{2} \quad (16)$$

En este contexto,  $u$  se asocia a la velocidad en el eje  $z$ . Asimismo, entre la placa y la envolvente hay una distancia de  $h$ . Cuando se combinan las ecuaciones (13) y (14), la ecuación diferencial dada en la ecuación resultante puede resolverse para determinar la distribución de temperatura.

$$0 = N \frac{v^2}{k^2} + K \left[ \frac{d^2 T}{dz^2} \right] \quad (17)$$

$N$ : Es un coeficiente relacionado con el flujo de calor generado dentro del sistema. Representa la tasa de generación de calor por unidad de volumen y es un parámetro que depende del contexto específico del problema. Se relaciona con las fuentes de calor internas, reacciones químicas o procesos térmicos dentro del sistema.

$v$ : Representa la velocidad del fluido a lo largo del eje  $z$ . En el contexto de este problema, el fluido se mueve entre las placas paralelas y la envoltura, y esta velocidad tiene un impacto significativo en la distribución de temperatura. Cuanto mayor sea la velocidad del fluido, mayor será la transferencia de calor y, por lo tanto, afectará la variación térmica en el sistema.

$k$ : Es la conductividad térmica del material que conforma el sistema. Es una propiedad del material que indica su capacidad para conducir el calor. Valores más altos de  $k$  indican que el material tiene una mejor capacidad para conducir el calor, lo que resulta en una distribución de temperatura más homogénea.

$K$ : Es un coeficiente de proporcionalidad que relaciona la transferencia de calor debido a la variación de temperatura con la velocidad del fluido. En esta ecuación,  $K$  representa la relación entre el término de advección (proporcional a la velocidad del fluido) y el término de difusión (proporcional a la segunda derivada de la temperatura con respecto a  $z$ ). Es un parámetro que depende de las características específicas del sistema y puede variar en diferentes aplicaciones y condiciones.

$\frac{d^2T}{dz^2}$ : Representa la segunda derivada de la temperatura con respecto a la coordenada  $z$ . En otras palabras, es la tasa de cambio de la tasa de cambio de temperatura con respecto a la dirección  $z$ . Esta derivada describe cómo la temperatura varía en función de la posición vertical a lo largo del sistema.

Por otro lado, la resolución de la ecuación diferencial se presenta a continuación:

$$T = T_L + (TU - Te) \frac{z}{h} + \frac{NU^2}{ZK} \left[ \frac{Z}{h} - \frac{z^2}{h^2} \right] \quad (18)$$

$T$ : Representa la temperatura en el panel fotovoltaico en una ubicación específica a lo largo de la dirección vertical  $z$ . La temperatura varía en función de la posición  $z$  y está determinada por varios términos en la ecuación.

$T_L$ : Es la temperatura en la base del panel fotovoltaico, que es el valor de referencia para la distribución de temperatura. Esta temperatura puede depender de las condiciones ambientales y otras consideraciones específicas del sistema.

$TU$ : Representa la temperatura en la parte superior del panel fotovoltaico. Es otro valor de referencia que influye en la distribución de temperatura a lo largo de la dirección  $z$ .

$Te$ : Es la temperatura del entorno que rodea al panel fotovoltaico. Es un factor importante ya que afecta la transferencia de calor entre el panel y el entorno circundante.

$z$ : Es la coordenada vertical que indica la posición a lo largo del panel fotovoltaico. Varía desde 0 en la base hasta  $h$  en la parte superior, donde  $h$  es la distancia entre la base y la parte superior del panel.

$h$ : Es la distancia entre la base y la parte superior del panel fotovoltaico. Es un parámetro que define la altura total del panel.

$NU$ : Representa la velocidad del fluido que fluye a través del panel fotovoltaico. Esta velocidad del fluido es importante porque influye en la transferencia de calor en el panel.

$K$ : Es un coeficiente de proporcionalidad que relaciona la advección (término proporcional a  $NU^2$ ) con la difusión térmica en el panel. Esta relación determina cómo la velocidad del fluido afecta la distribución de temperatura en el panel.

$\frac{z}{h} - \frac{z^2}{h^2}$ : Es un término que describe cómo la distribución de temperatura varía con respecto a la posición  $z$ . Este término tiene en cuenta tanto la convección del fluido como la variación térmica en función de la altura del panel.

La distribución de la temperatura del panel fotovoltaico puede hallarse mediante la ecuación (18) (Marrakchi et al., 2018)(Browne et al., 2015). Por otro lado, para simular el sistema se utilizará el software Autodesk CFD, que es una herramienta computacional para la simulación fluidodinámica que puede modelar cualquier tipo de sistema, incluidos los sistemas solares (Hernandez-Perez et al., 2020).

El programa utiliza ecuaciones parcialmente diferenciales, como las ecuaciones de continuidad, de Navier Stokes y de energía, para modelizar el calor y el movimiento de los fluidos. Debido a la naturaleza acoplada y no lineal de estas ecuaciones, es imposible proporcionar una solución analítica universal para cada situación. Mediante el uso de técnicas analíticas aproximativas, como el método de los elementos finitos, el programa genera una solución (Doctorado & Avanzados, 2017)

Por último, el programa CFD visualiza el resultado de las ecuaciones en forma de intercambio de calor, vector de velocidad, esfuerzo cortante y otros resultados (Di Capua H et al., 2018). A continuación, se demuestra el proceso lógico para parametrizar y simular una estructura en Autodesk CFD.

**Tabla 2.** Análisis componente térmico

<b>Procedimiento lógico para simulación en CFD Autodesk</b>
<b>Paso 1:</b> Importe el componente 3D creado en Autodesk Inventor.
<b>Paso 2:</b> Encierre el área que se está estudiando en una envoltura.
<b>Paso 3:</b> Parametrizar cada estructura según el tipo de material de la pieza.
<b>Paso 4:</b> Establecer las condiciones de contorno.
<b>Paso 5:</b> Establezca las condiciones iniciales.
<b>Paso 6:</b> Construya la malla de descomposición para la estructura de estudio.
<b>Paso 7:</b> Elija el tipo de fluido para la investigación.
<b>Paso 8:</b> Parametrice la transferencia de calor.
<b>Paso 9:</b> Precise la cantidad de iteraciones para la resolución.
<b>Paso 10:</b> Iniciar simulación.

**Fuente:** La autora

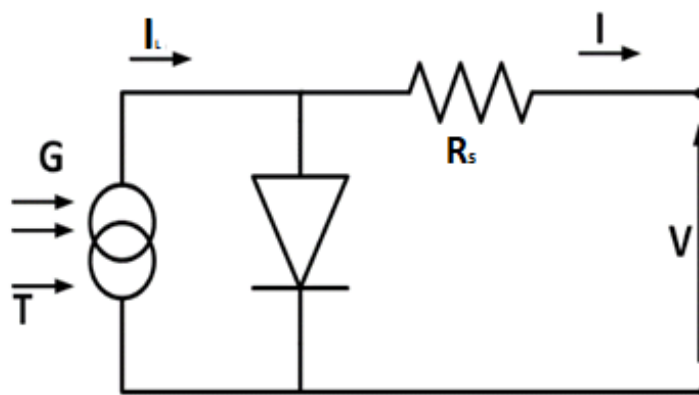
### **3.3. Modelo eléctrico del sistema**

Una fuente de corriente y un diodo se conectan en paralelo para formar el modelo eléctrico de la celda solar. La cantidad de luz que incide en el panel solar afecta directamente a la corriente suministrada por la fuente de corriente. El diodo controla los parámetros corriente-voltaje de la célula y tiene propiedades prácticamente

perfectas. Con sólo incluir los siguientes parámetros, se puede aumentar fácilmente la precisión, sofisticación y complejidad del modelo:

- Considerando la conexión existente entre la temperatura y la corriente de saturación del diodo ( $I_0$ )
- Otro aspecto relevante es la conexión intrínseca entre la temperatura y la foto corriente ( $I_L$ ).
- La adición de una resistencia  $R_S$  en serie permite obtener una precisión adecuada entre la tensión de circuito abierto y el punto de máxima potencia.
- La adición de una resistencia  $R_P$  en paralelo.
- Establecimiento de una variable  $n$ , la cual determina la calidad.

Para este experimento se utilizó un modelo bastante sofisticado. En el modelo se incluye una resistencia en serie  $R_S$ , un diodo en derivación con el factor de calidad del diodo, la dependencia de la temperatura de la fotocorriente  $I_L$  y la corriente de saturación  $I_0$  del diodo para obtener una curva de mayor calidad. El modelo de panel fotovoltaico se muestra en la Figura 6.



**Figura 7.** Modelo equivalente eléctrico de panel fotovoltaico.  
**Fuente:** Autora

Las siguientes ecuaciones describen las características de corriente-voltaje del panel solar:

$$I = I_L - I_0 \left( e^{\frac{q(V+I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (19)$$

$$I_L = I_L(T_1) * (1 + K_0(T - T_1)) \quad (20)$$

$$I_L(T_1) = G * \frac{I_{sc}(T_1, \text{nom})}{G(\text{nom})} \quad (21)$$

$$K_0 = \frac{I_{sc}(T_2) - I_{sc}(T_1)}{(T_2 - T_1)} \quad (22)$$

$$I_0 = I_0(T_1) * \left( \frac{T}{T_1} \right)^{\frac{3}{n}} * e^{-\frac{q \cdot V_g}{n \cdot k} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_1} \right)} \quad (23)$$

$$I_0(T_1) = \frac{I_{sc}(T_1)}{\frac{q \cdot Voc(T_1)}{n \cdot k \cdot T_1} - 1} \quad (24)$$

$$R_s = -\frac{dV}{dI_{Voc}} - \frac{1}{X_V} \quad (25)$$

$$X_V = I_0(T_1) * \frac{q}{n \cdot k \cdot T_1} * e^{\frac{q \cdot Voc(T_1)}{n \cdot k \cdot T_1}} \quad (26)$$

De lo anterior, la foto corriente del diodo se representa por  $I_L$ . Asimismo, la corriente de saturación del diodo se asocia con  $I_0$ . La resistencia en serie corresponde a  $R_s$ . La constante de Boltzman es  $1.36 \cdot 10^{-23}$  y se asocia con  $k$ , mientras que, la carga del electrón es de  $1.6 \cdot 10^{-19}$  y se denomina mediante  $q$ . El voltaje de banda prohibida adopta una magnitud de  $1.2V$  y se asocia a  $V_g$ . Asimismo, el factor de calidad del diodo posee un valor de  $36$  y es representado por  $n$ .  $Voc(T_1)$  se enlaza con la tensión de circuito abierto cuando existe temperatura ambiente ( $21.06V$ ).  $I_{sc}(T_1)$  se liga a la corriente de cortocircuito cuando se presenta temperatura ambiente ( $3.80 A$ ).  $Voc(T_2)$  se vincula a la tensión de circuito abierto ( $17.05/n V$ ).  $I_{sc}(T_2)$  se relaciona la corriente

de cortocircuito (3.92A). Por su parte,  $G$  representa la irradiancia del sol expresado en  $\left(\frac{W}{m^2}\right)$ , asimismo,  $T_2$  corresponde a la temperatura de funcionamiento del arreglo solar expresado en °C. Por último, el gradiente de temperatura en un tiempo dado se representa por  $T_1$ .

Cada fabricante de paneles fotovoltaicos puede tener constantes diferentes, de ahí que para el estudio se haya elegido un panel solar MSX60 de 60W (SOLAREX, 2019).

Directamente inversamente relacionada con la irradiancia  $G$  está la fotocorriente del diodo  $I_L$ . El diodo recibe una cantidad muy pequeña de corriente cuando la célula está en cortocircuito. La constante de proporcionalidad de la ecuación (21) muestra que la corriente nominal de cortocircuito se suministra a la irradiancia nominal, que suele ser de 1 sol (1000 Wm(-2)), y la  $I_{sc}$  del panel solar MSX60 es igual a 3,8 A, cuando la temperatura es de 25°C y la irradiancia es de 1 sol. La ecuación (21) representa el cambio de la foto intensidad en función de la temperatura como una relación lineal, asimismo, esta describe el cambio de fotocorriente en función de la temperatura, en el panel fotovoltaico MSX60. La fotocorriente  $I_L$  varía entre 3,80 y 3,92, es decir, un 3%, cuando la temperatura cambia de 25 °C a 75 °C. Además, cuando la celda solar no está iluminada, la relación entre la tensión de circuito abierto y la corriente de cortocircuito se describe mediante la ecuación de Shockley (25). Esta describe la corriente de saturación  $I_0$  en función de la tensión de circuito abierto y la corriente de cortocircuito de la electricidad a una determinada temperatura, si la celda está descargada.  $I_L$  pasa por todo el diodo, por lo que la característica I-V comienza desde el principio y llega a producir  $I_L$  cómo se describe en la ecuación (19).

La pendiente de la curva I-V, especialmente el voltaje en circuito abierto está muy influenciado por la resistencia en serie de la celda, que es de  $8m\Omega$  para la célula

MSX60. El siguiente pseudocódigo contiene todas las ecuaciones que describen el sistema.

**Tabla 3.** Análisis componente eléctrico

---

**Método para la cuantificación de las especificaciones técnicas de los paneles solares (voltaje, corriente y potencia).**

---

**Paso 1:** Precisar los parámetros de tensión e irradiancia en los terminales del panel solar.

**Paso 2:** Importe los valores de temperatura de Autodesk CFD.

**Paso 3:** Determinar la resistencia en serie del panel fotovoltaico.

$$R_s = -\frac{dV}{dI_{Voc}} - \frac{1}{Xv}$$

**Paso 4:** Definir la corriente de saturación del diodo.

$$I_0(T_1) = \frac{I_{sc}(T_1)}{e^{\frac{q*Voc(T_1)}{n*k*T_1} - 1}}$$

**Paso 5:** Cálculos de la fotocorriente del diodo.

$$I_L = I_L(T_1) * (1 + K_0(T - T_1))$$

**Paso 6:** Para un voltaje V, determine la corriente de cortocircuito.

$$I = I_L - I_0 \left( e^{\frac{q(V+I*R_s)}{n*k*T}} - 1 \right)$$

---

**Fuente:** La autora



## **CAPITULO IV RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN**

En esta sección, se llevará a cabo el análisis de los resultados, es decir, los resultados de la investigación, obtenidos en los escenarios previamente planteados. Se examinará minuciosamente el comportamiento térmico y el rendimiento eléctrico del sistema. Además, se llevará a cabo un análisis exhaustivo de la eficiencia del sistema fotovoltaico en función de la temperatura variable.

### **4.1. Exposición de resultados térmicos**

La disposición de los paneles solares fotovoltaicos es un factor crucial para garantizar su rendimiento óptimo. En este estudio, se han establecido tres escenarios distintos para analizar los resultados del sistema de enfriamiento natural. Cada uno de los escenarios utiliza el mismo número de paneles (12 en total), las mismas características técnicas y el mismo sistema de enfriamiento (natural), pero con una temperatura inicial diferente.

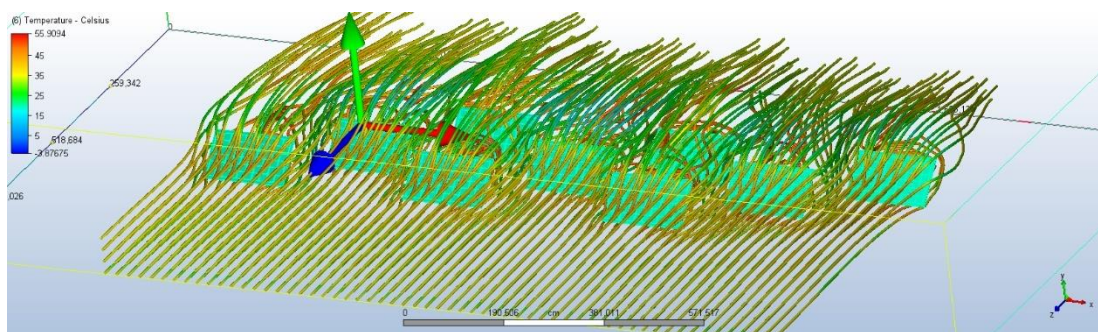
La diferencia de temperatura en los paneles es significativa ya que cada escenario se basa en un patrón diferente.

#### **4.1.1. Conjunto fotovoltaico – temperatura inicial baja**

El escenario inicial consiste en una matriz de 12 paneles fotovoltaicos con una separación limitada. Para configurar este escenario, se utilizó una envolvente tipo túnel con viento dirigido positivamente a lo largo del eje z, y las condiciones iniciales de temperatura en un rango de 19 °C – 26 °C. El examen se basó en los principios de la dinámica de fluidos, en la que el viento se empleó como mecanismo de ventilación natural que facilitaba la refrigeración del conjunto fotovoltaico, lo que se traduce en una producción de energía y una eficiencia de los paneles diferentes. Las ecuaciones

gubernantes del conjunto fotovoltaico fueron las ecuaciones de Navier-Stokes de energía.

Las ecuaciones de Navier-Stokes describen el movimiento de los fluidos y la transferencia de calor dentro del campo fotovoltaico. Analizando estas ecuaciones, fue posible evaluar el efecto del viento en la temperatura del sistema. El examen de la dinámica de fluidos permitió determinar las velocidades del flujo de aire y los patrones de circulación dentro de la envolvente tipo túnel. Esto, a su vez, permitió evaluar la eficiencia de refrigeración del conjunto fotovoltaico y la eficiencia energética obtenida durante el proceso.



**Figura 8.** Comportamiento térmico – temperatura inicial baja  
**Fuente:** La autora

La Figura 8 muestra un conjunto fotovoltaico formado por 12 paneles con espaciado limitado, expuesto a una velocidad del viento de 30 m/s. Cada fila de paneles muestra un valor de temperatura único, como indica la paleta de colores generada por la simulación realizada con el software Autodesk CFD. El proceso de simulación implicó 100 iteraciones a lo largo de 30 minutos, lo que dio lugar a la obtención de valores de temperatura. Estos resultados se han documentado en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Gradiente de temperatura escenario 1.

# Línea	Gradiente de temp (°C)
1	20
2	23.7
3	25.6
4	26

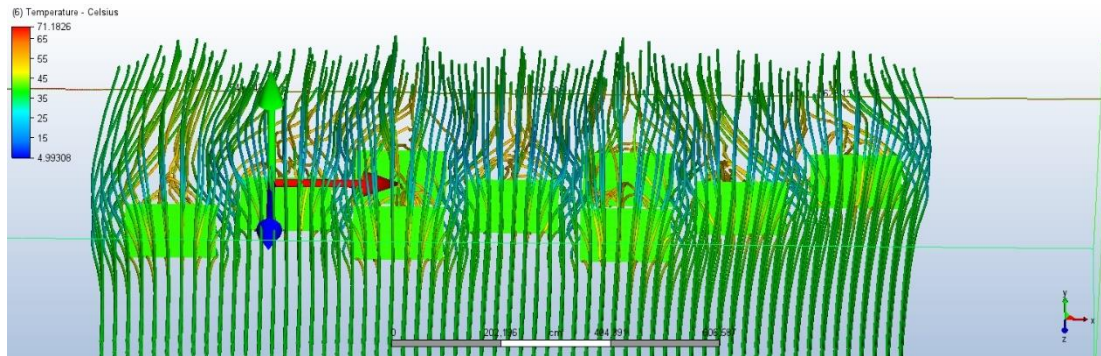
**Fuente:** La autora

La primera fila, expuesta directamente al viento, mantuvo una temperatura de 20°C. Sin embargo, la segunda hilera mostró una temperatura ligeramente superior, de 23,7°C, debido a la menor refrigeración causada por la obstrucción del paso del viento por la primera hilera. La tercera hilera mostró una temperatura aún más alta, de 25,6°C, debido a la mayor obstaculización del paso del viento causada por las hileras precedentes. Por último, la cuarta fila presentaba la temperatura más alta, de 26°C, ya que los paneles de las filas 1, 2 y 3 actuaban como obstrucciones al flujo del viento hacia esta fila.

#### **4.1.2. Conjunto fotovoltaico – temperatura inicial media**

El segundo escenario consiste en una matriz fotovoltaica de 12 paneles con espaciado restringido, configurada mediante una envolvente en forma de túnel que dirigía el viento positivamente a lo largo del eje z, y las condiciones iniciales de temperatura en un rango de 40 °C – 50 °C. El análisis se basó en los principios de la dinámica de fluidos, con el viento sirviendo como mecanismo de ventilación natural para enfriar la matriz fotovoltaica y dando lugar a una producción de energía y una eficiencia de los paneles variables. Las ecuaciones de energía de Navier-Stokes gobernaron el campo fotovoltaico, proporcionando información sobre el movimiento de los fluidos y la transferencia de calor dentro del mismo. El análisis de estas ecuaciones determinó el impacto del viento en la temperatura del sistema. Además, el

examen de la dinámica de fluidos facilitó la determinación de las velocidades del flujo de aire y los patrones de circulación dentro de la envolvente tipo túnel, lo que permitió evaluar la refrigeración y la eficiencia energética del campo fotovoltaico.



**Figura 9.** Comportamiento térmico – temperatura inicial media  
**Fuente:** La autora

El conjunto fotovoltaico representado en la Figura 9 se compone de 12 paneles con espaciado limitado y está expuesto a una velocidad del viento de 30 m/s. Cada fila de paneles muestra un valor de temperatura distinto, como muestra la paleta de colores generada a partir de la simulación con el software Autodesk CFD. La simulación incluyó 100 iteraciones a lo largo de un periodo de 30 minutos y arrojó los valores de temperatura que se registran en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Gradiente de temperatura escenario 2.

# Línea	Gradiente de temp (°C)
1	40
2	43.7
3	45.6
4	50

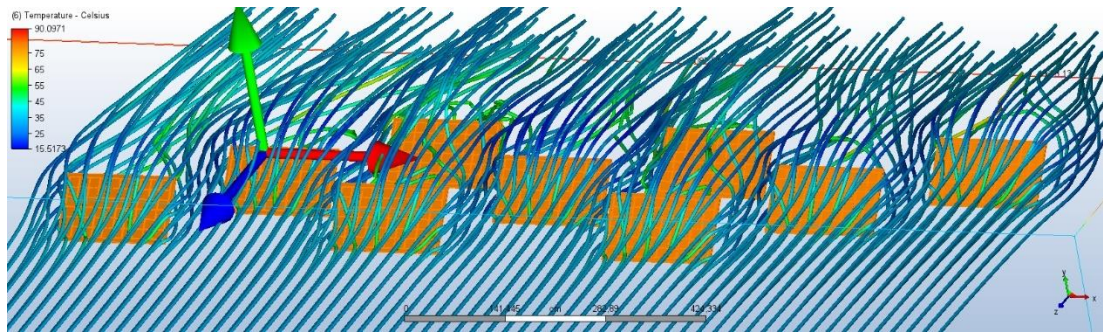
**Fuente:** La autora

La temperatura de la primera fila, expuesta directamente al viento, se mantuvo en 40°C. Sin embargo, la segunda fila mostró una temperatura ligeramente superior,

de 43,7 °C, debido a la obstrucción del paso del viento por la primera fila, lo que redujo la refrigeración. La tercera hilera mostró una temperatura aún más alta, de 45,6 °C, que puede atribuirse a la mayor obstrucción del paso del viento causada por las hileras precedentes. La cuarta fila, por el contrario, mostró la temperatura más alta, de 50 °C, ya que los paneles de las filas 1, 2 y 3 impedían el paso del viento a esta fila.

#### **4.1.3. Conjunto fotovoltaico – temperatura inicial alta**

En el tercer escenario, se estudió un conjunto fotovoltaico formado por 12 paneles con una separación limitada. Los paneles se dispusieron en una envolvente en forma de túnel, y el viento se dirigió positivamente a lo largo del eje z para enfriar el conjunto fotovoltaico de forma natural, y las condiciones iniciales de temperatura en un rango de 80 °C – 90 °C. Este enfoque se analizó empleando principios de dinámica de fluidos, lo que dio como resultado una potencia de salida y una eficiencia de los paneles variables. Se utilizaron las ecuaciones de energía de Navier-Stokes para gobernar el campo fotovoltaico, lo que permitió comprender mejor el movimiento de los fluidos y la transferencia de calor dentro del campo. El impacto del viento en la temperatura del sistema se determinó analizando estas ecuaciones. Además, se examinaron las velocidades del flujo de aire y los patrones de circulación dentro de la envolvente tipo túnel, lo que permitió evaluar la refrigeración y la eficiencia energética del campo fotovoltaico.



**Figura 10.** Comportamiento térmico – temperatura inicial alta  
**Fuente:** La autora

En la Figura 10 se muestra un conjunto fotovoltaico formado por 12 paneles con un espaciado limitado que está expuesto a una velocidad del viento de 30 m/s. La paleta de colores resultante de la simulación realizada con el software Autodesk CFD muestra distintos valores de temperatura para cada fila de paneles. Estos valores se han registrado en la Tabla 6. El proceso de simulación incluyó 100 iteraciones ejecutadas durante un periodo de 30 minutos.

**Tabla 6.** Gradiente de temperatura escenario 3.

# Línea	Gradiente de temp (°C)
1	70
2	73.2
3	75.6
4	76

**Fuente:** La autora

La temperatura de la primera fila, que daba directamente al viento, se mantuvo en 70°C. Sin embargo, la segunda fila tenía una temperatura ligeramente superior, de 73,2°C, debido a la reducción de la refrigeración causada por la obstrucción del paso del viento por la primera fila. La tercera fila tenía una temperatura aún más alta, de 75,6°C, ya que las filas precedentes obstruían aún más el paso del viento. Por último,

la cuarta fila mostró la temperatura más alta, de 76 °C, ya que los paneles de las filas 1, 2 y 3 actuaron como obstrucciones al flujo del viento hacia esta fila.

## 4.2.Exposición de resultados eléctricos

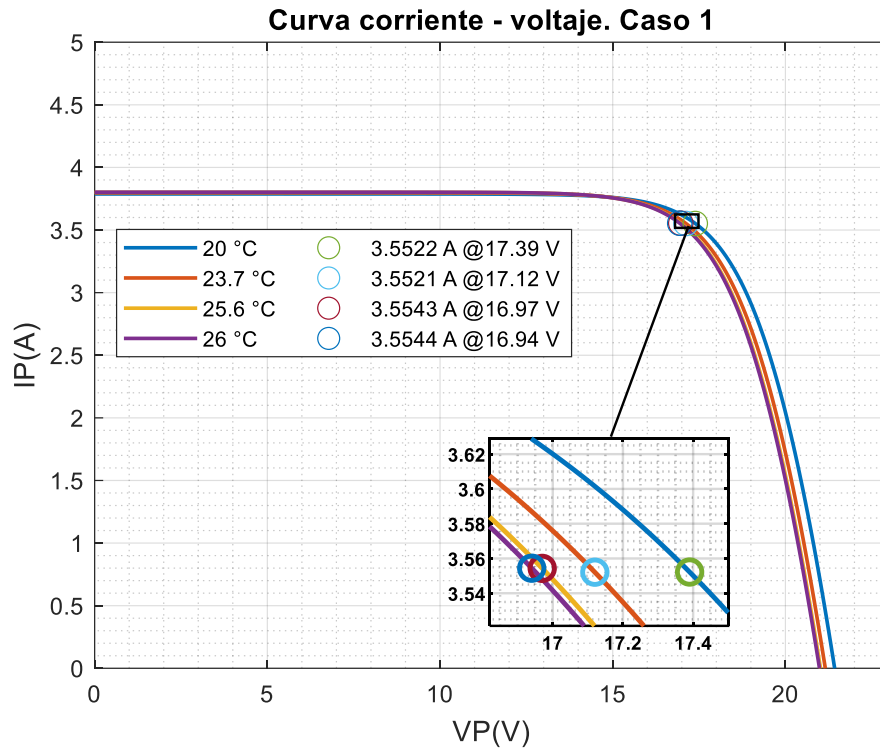
### 4.2.1. Escenario 1: conjunto fotovoltaico – temperatura inicial baja

Para analizar el rendimiento eléctrico del escenario 1, se utilizaron las ecuaciones de energía de Navier-Stokes para modelar el sistema fotovoltaico. Las temperaturas obtenidas del análisis térmico del primer escenario se documentaron en la Tabla 4 y se utilizaron en la ecuación (19) para calcular la corriente, que se resolvió mediante el método Newton-Raphson. A continuación, se calculó la producción de energía de cada fila y panel del conjunto, basándose en una condición de funcionamiento del panel de  $1 \text{ kW/m}^2$  de irradiación y en el vector de temperaturas obtenido del análisis térmico, tal como se describe en la Tabla 7, en la Figura 11 y 12.

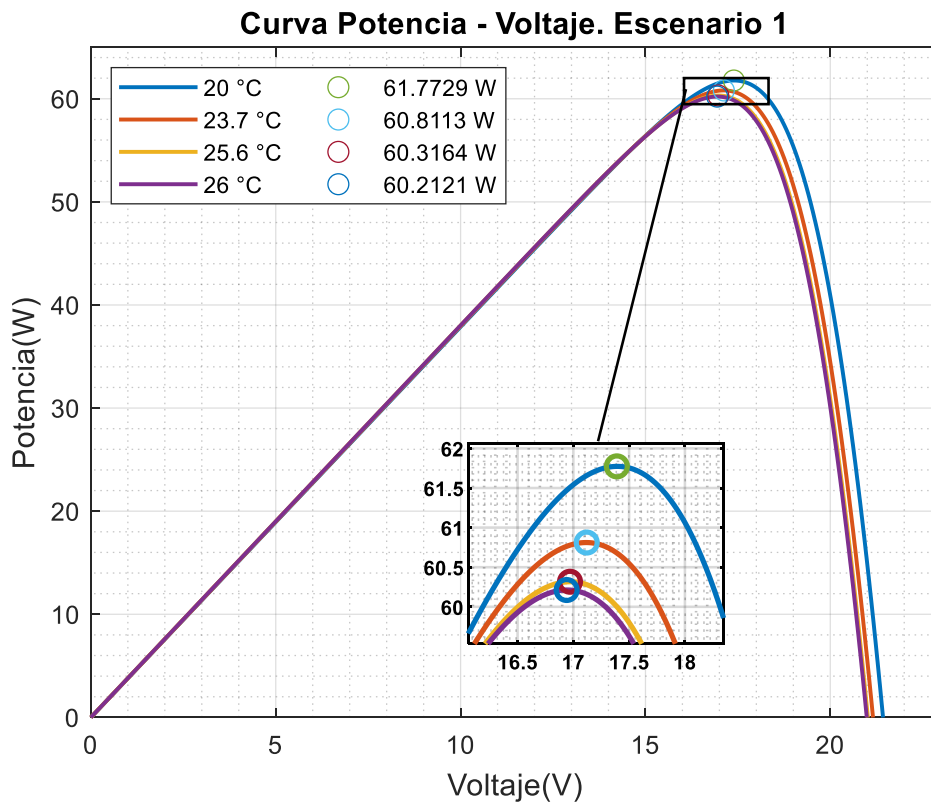
**Tabla 7.** Gradiente de temperatura escenario 1.

# Línea	Temperatura (°C)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
1	20	17.39	3.5522	61.77
2	23.7	17.12	3.5521	60.81
3	25.6	16.97	3.5543	60.31
4	26	16.94	3.5544	60.21

**Fuente:** La autora



**Figura 11.** Comportamiento eléctrico – temperatura inicial baja  
**Fuente:** La autora



**Figura 12.** Comportamiento P-V – temperatura inicial baja  
**Fuente:** La autora



Los resultados indican que las primeras filas del campo fotovoltaico de 12 paneles alcanzan la mayor potencia según la hoja característica del panel fotovoltaico, mientras que la potencia disminuye gradualmente en las filas siguientes. Por otro lado, la eficiencia de un panel viene determinada por la siguiente ecuación.

$$m = \frac{P_{calculada}}{P_{real}} = \frac{I_{max} * V_{max}}{\text{Área de celda} * \text{Irradiancia}} \quad (27)$$

$m$  es la eficiencia del panel fotovoltaico, expresada como un valor decimal o porcentaje.

$P_{calculada}$  es la potencia calculada del panel fotovoltaico, que se obtiene multiplicando la corriente máxima ( $I_{max}$ ) y la tensión máxima ( $V_{max}$ ) que puede proporcionar el panel.

$P_{real}$  es la potencia real generada por el panel fotovoltaico en condiciones reales de funcionamiento.

$I_{max}$  es la corriente máxima que puede suministrar el panel fotovoltaico bajo las condiciones de máxima radiación solar.

$V_{max}$  es el voltaje máximo que puede suministrar el panel fotovoltaico bajo las condiciones de máxima radiación solar.

Área de celda es el área de la superficie de la celda fotovoltaica del panel, que se utiliza para calcular la potencia teórica máxima que puede generar.

Irradiancia es la cantidad de radiación solar incidente en el panel fotovoltaico por unidad de área, expresada en W/m<sup>2</sup>.

La ecuación (27) presenta una fórmula que puede utilizarse para calcular la eficiencia de un panel fotovoltaico. La ecuación tiene en cuenta la corriente de potencia

máxima ( $I_{max}$ ) del panel en amperios, la tensión de potencia máxima ( $V_{max}$ ) del panel en voltios, la superficie del panel en metros cuadrados y la irradiancia en  $\text{kW}/\text{m}^2$ . En consonancia, la eficiencia para el escenario 1 (Tabla 8) promedian el 10% aproximadamente.

**Tabla 8.** Cálculo de eficiencia por celda.

Línea	Área de la celda $\text{m}^2$	Potencia simulada (kW)	m (%)
1	0.6	0,062	10,30
2	0.6	0,061	10,14
3	0.6	0,060	10,05
4	0.6	0,060	10,04

**Fuente:** La autora

Para calcular la potencia total del campo fotovoltaico de 12 paneles del escenario 1, se multiplica la producción de energía de cada fila por el número de paneles de la fila y se suman los valores resultantes. Con este cálculo se obtiene la potencia total del campo. La Tabla 9 contiene los resultados de este cálculo, que muestra la potencia total del campo fotovoltaico (729.3 W) de 12 paneles en las condiciones de funcionamiento especificadas.

**Tabla 9.** Potencia total de arreglo fotovoltaico

Línea	Celdas por fila	Potencia simulada (W)	Total (W)
1	3	61.77	185,31
2	3	60.81	182,43
3	3	60.31	180,93
4	3	60.21	180,63
Potencia total de sistema solar			729,3 W

**Fuente:** La autora

#### 4.2.2. Escenario 2: conjunto fotovoltaico – temperatura inicial media

Para evaluar el rendimiento eléctrico del escenario 2, además, se utilizaron las ecuaciones de energía de Navier-Stokes para modelar el sistema fotovoltaico. Los valores de temperatura obtenidos en el análisis térmico se registraron en la Tabla 5 y se utilizaron para calcular la corriente mediante la ecuación (19), que se resolvió con el método Newton-Raphson. A continuación, se calculó la potencia de salida de cada fila y panel del conjunto, suponiendo una irradiancia de  $1 \text{ kW/m}^2$  y utilizando los valores de temperatura de la Tabla 10, la Figura 13 y 14.

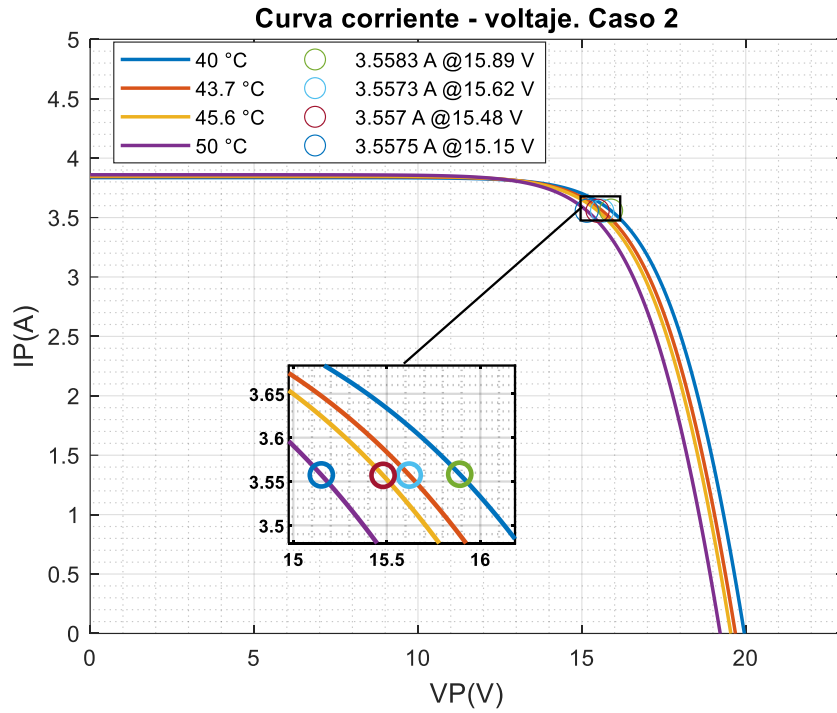
**Tabla 10.** Gradiente de temperatura escenario 2.

# Línea	Temperatura (°C)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
1	40	15.89	3.5583	56.54
2	43.7	15.62	3.5573	55.56
3	45.6	15.48	3.557	55.06
4	50	15.15	3.5575	53.89

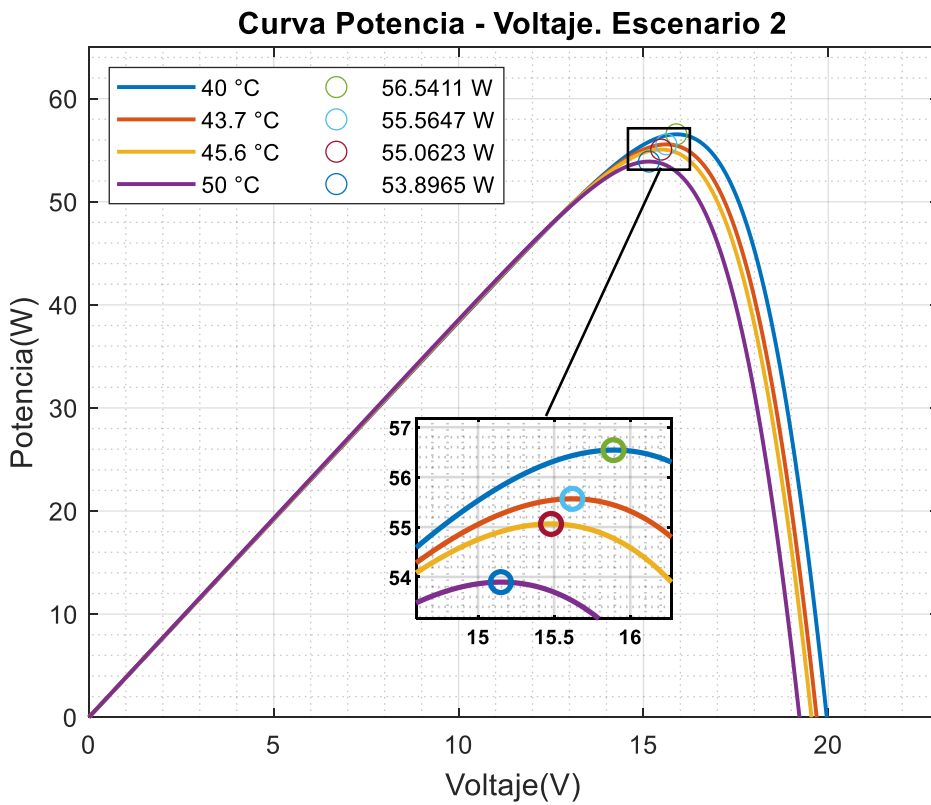
**Fuente:** La autora

Según los resultados obtenidos, las primeras filas del campo fotovoltaico de 12 paneles producen la mayor potencia de acuerdo con la hoja característica del panel fotovoltaico, mientras que la potencia disminuye ligeramente en las filas siguientes. Además, la eficiencia del panel puede determinarse mediante la ecuación que se indica a continuación:

$$m = \frac{P_{cal\_esc2}}{P_{real\_esc2}} = \frac{I_{max\_esc2} * V_{max\_esc2}}{\text{Área de celda}_{esc2} * Irradiancia_{esc2}} \quad (28)$$



**Figura 13.** Comportamiento eléctrico – temperatura inicial media  
**Fuente:** La autora



**Figura 14.** Comportamiento P-V – temperatura inicial media, escenario 2  
**Fuente:** La autora

La ecuación (28) proporciona una fórmula que puede utilizarse para calcular la eficiencia de un panel fotovoltaico. Esta ecuación tiene en cuenta la corriente de potencia máxima ( $I_{max}$ ) del panel en amperios, el voltaje de potencia máxima ( $V_{max}$ ) del panel en voltios, la superficie del panel en metros cuadrados y la irradiancia en  $kW/m^2$ . Basándose en esta ecuación, la eficiencia para el escenario 2 (tal y como se presenta en la Tabla 11) ronda el 9% de media.

**Tabla 11.** Cálculo de eficiencia por celda, escenario 2.

Línea	Área de la celda $m^2$	Potencia simulada (kW)	$\eta$ (%)
1	0.6	0,057	9,42
2	0.6	0,056	9,26
3	0.6	0,055	9,18
4	0.6	0,054	8,98

**Fuente:** La autora

Para determinar la potencia total del campo fotovoltaico de 12 paneles del escenario 2, se calculó la potencia de cada fila multiplicando el número de paneles de cada fila por sus respectivas potencias. Estos valores se sumaron para obtener la potencia total del campo. Los resultados de este cálculo se muestran en la Tabla 12, que indica que el campo fotovoltaico de 12 paneles produjo una potencia total de 663,15 W en las condiciones de funcionamiento dadas.

**Tabla 12.** Potencia total de arreglo fotovoltaico, escenario 2

Línea	Celdas por fila	Potencia simulada (W)	Total (W)
1	3	56.54	169,62
2	3	55.56	166,68
3	3	55.06	165,18
4	3	53.89	161,67
Potencia total de sistema solar			663,15 W

**Fuente:** La autora

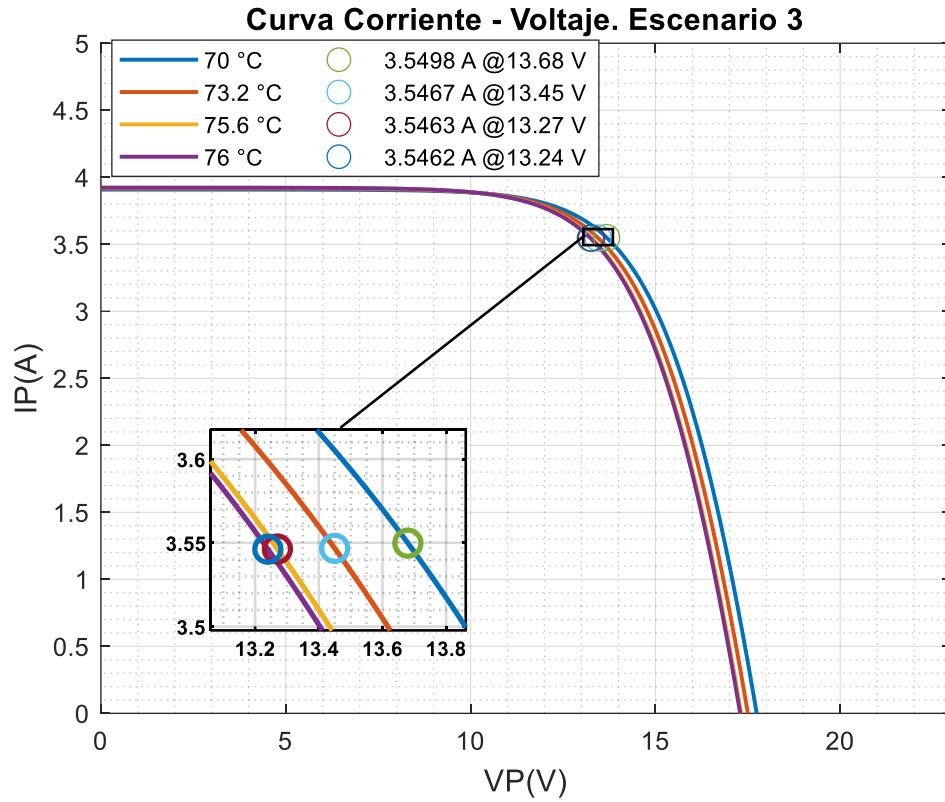
### 4.2.3. Escenario 3: conjunto fotovoltaico – temperatura inicial alta

Para evaluar el rendimiento eléctrico del escenario 3, se utilizaron las ecuaciones de energía de Navier-Stokes para crear un modelo del sistema fotovoltaico. Los datos de temperatura obtenidos del análisis térmico se registraron en la Tabla 6 y se utilizaron para calcular la corriente mediante la ecuación (19), que se resolvió utilizando el método Newton-Raphson. A continuación, se calculó la potencia de salida de cada fila y panel del conjunto basándose en una condición de funcionamiento del panel de  $1 \text{ kW/m}^2$  de irradiancia y el vector de temperatura obtenido del análisis térmico, como se describe en las Figuras 15-16 y en la Tabla 13.

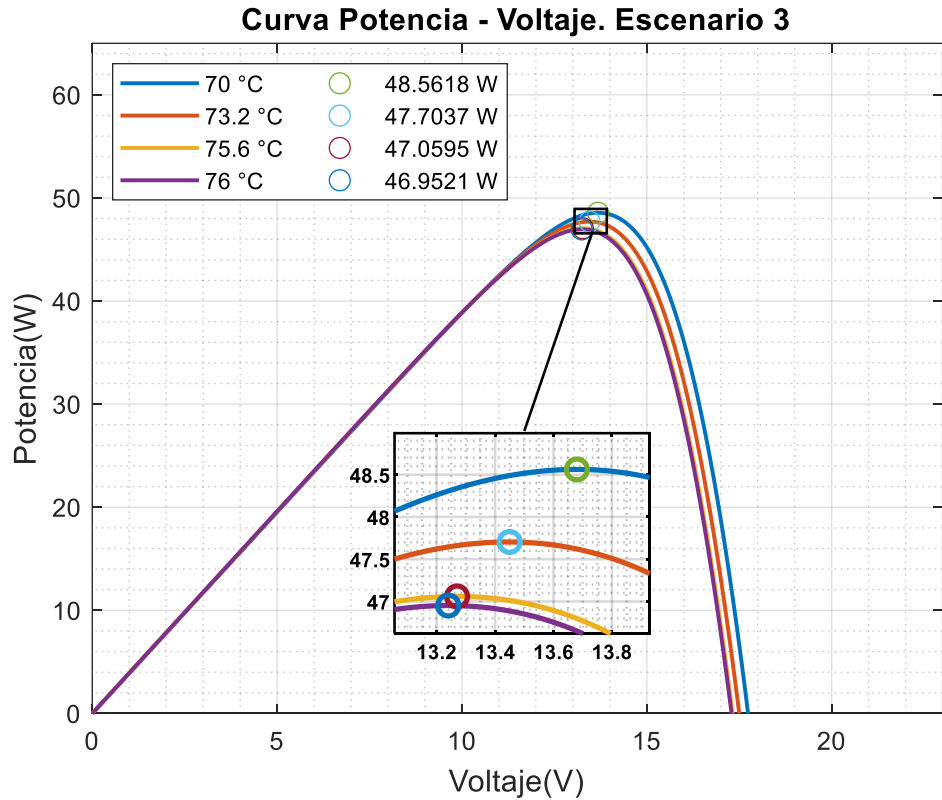
**Tabla 13.** Gradiente de temperatura escenario 3.

# Línea	Temperatura (°C)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
1	70	13.68	3.5498	48.56
2	73.2	13.45	3.5467	47.70
3	75.6	13.27	3.5463	47.05
4	76	13.24	3.5462	46.95

**Fuente:** La autora



**Figura 15.** Comportamiento I-V – temperatura inicial alta, escenario 3  
**Fuente:** La autora



**Figura 16.** Comportamiento P-V – temperatura inicial alta, escenario 3  
**Fuente:** La autora

Los resultados de la investigación indican que las primeras filas del campo fotovoltaico de los 12 paneles producen la máxima potencia según la hoja característica del panel fotovoltaico, mientras que la potencia disminuye ligeramente en las filas siguientes. Además, la eficiencia de un panel puede determinarse utilizando la siguiente fórmula:

$$m = \frac{P_{cal\_esc3}}{P_{real\_esc3}} = \frac{I_{max\_esc3} * V_{max\_esc3}}{\text{Área de celda}_{esc3} * Irradiancia_{esc3}} \quad (29)$$

$m$  es la eficiencia del panel fotovoltaico, expresada como un valor decimal o porcentaje.

$P_{cal\_esc3}$  es la potencia calculada del panel fotovoltaico, que se obtiene multiplicando la corriente máxima ( $I_{max\_esc3}$ ) y el voltaje máximo ( $V_{max\_esc3}$ ) que puede proporcionar el panel.

$P_{real\_esc3}$  es la potencia real generada por el panel fotovoltaico en condiciones reales de funcionamiento.

$I_{max\_esc3}$  es la corriente máxima que puede suministrar el panel fotovoltaico bajo las condiciones de máxima radiación solar.

$V_{max\_esc3}$  es la tensión máxima que puede suministrar el panel fotovoltaico bajo las condiciones de máxima radiación solar.

$\text{Área de celda}_{esc3}$  es el área de la superficie de la celda fotovoltaica del panel, que se utiliza para calcular la potencia teórica máxima que puede generar.

$Irradiancia_{esc3}$  es la cantidad de radiación solar incidente en el panel fotovoltaico por unidad de área, expresada en W/m<sup>2</sup>.

La ecuación (30) proporciona una fórmula para calcular la eficiencia de un panel fotovoltaico en función de varios factores, como la corriente de potencia máxima ( $I_{max\_esc3}$ ) en amperios, la tensión de potencia máxima ( $V_{max\_esc3}$ ) en voltios, la



superficie del panel en metros cuadrados y la irradiancia en  $\text{kW/m}^2$ . La eficiencia de los paneles fotovoltaicos en el escenario 3 se presenta en la Tabla 14, mostrando una eficiencia media de aproximadamente el 7%.

**Tabla 14.** Cálculo de eficiencia por celda, escenario 3.

Línea	Área de la celda $\text{m}^2$	Potencia simulada (kW)	m (%)
1	0.6	0,049	8,09
2	0.6	0,048	7,95
3	0.6	0,047	7,84
4	0.6	0,047	7,83

**Fuente:** La autora

Para determinar la potencia total del campo fotovoltaico de 12 paneles del escenario 3, se multiplicaron el número de paneles de cada fila por sus respectivas potencias para calcular la potencia de cada una. A continuación, se sumaron la potencia de cada fila para obtener la potencia total del campo. Los resultados de este cálculo se presentan en la Tabla 15, que muestra que el campo fotovoltaico de 12 paneles produjo una potencia total de 570,78 W en las condiciones de funcionamiento dadas.

**Tabla 15.** Potencia total de arreglo fotovoltaico, escenario 3

Línea	Celdas por fila	Potencia simulada (W)	Total (W)
1	3	48,56	145,68
2	3	47,7	143,1
3	3	47,05	141,15
4	3	46,95	140,85
Potencia total de sistema solar			570,78 W

**Fuente:** La autora

#### 4.2.4. Comparación de resultados

En el presente apartado se comparan los resultados de los escenarios 1, 2 y 3 para determinar qué escenario tiene la mejor reducción de pérdidas (Tabla 16). Para

ello, se tiene en cuenta tres parámetros: la producción total de energía, la superficie y la eficiencia de cada escenario.

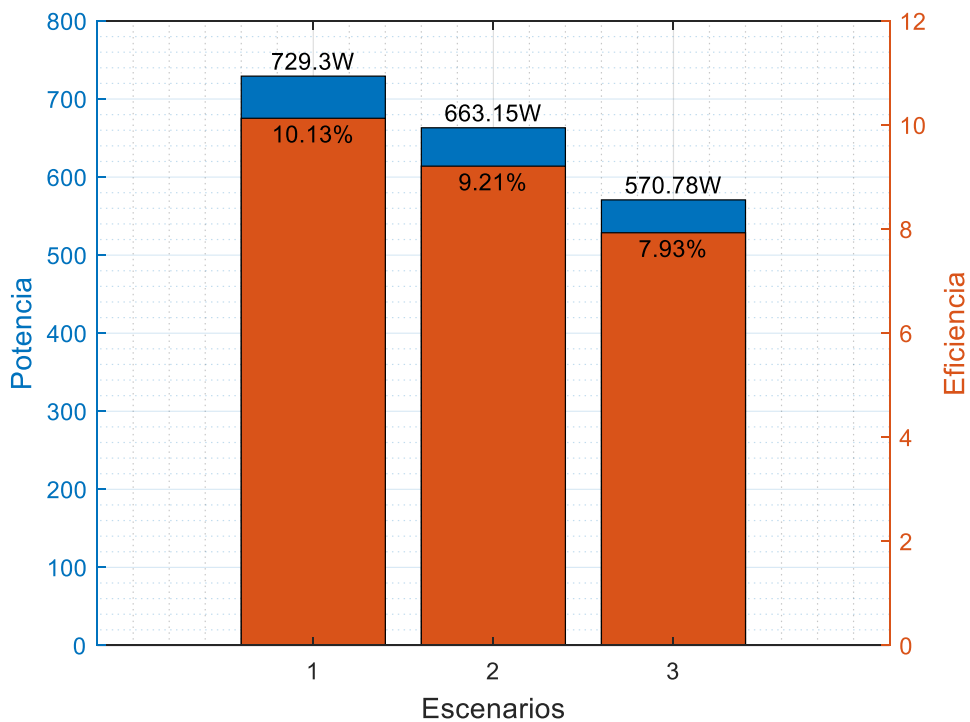
La potencia total es una medida de la cantidad de electricidad que puede generar cada escenario. La superficie sirve para medir el espacio necesario para implementar cada escenario, mientras que la eficiencia es una medida de la eficacia con la que el sistema fotovoltaico convierte la luz solar en electricidad.

Comparando estos parámetros, se puede determinar qué escenario ofrece el mejor equilibrio entre potencia, superficie y eficiencia (Figura 17). Esta información será útil para determinar el diseño óptimo de un sistema fotovoltaico.

**Tabla 16.** Comparación de resultados

Escenario	Área (m <sup>2</sup> )	Potencia Simulada (W)	Rendimiento (%)
1	10	729.3	10.13
2	10	663.15	9.21
3	10	570.78	7.93

**Fuente:** La autora



**Figura 17.** Comparación de resultados

**Fuente:** La autora

La comparación revela que el escenario 1 tiene la minimización de pérdidas más significativas en función de la potencia simulada, con una eficiencia del 10.13% y una potencia total de 729,3 W. Las condiciones óptimas de refrigeración para este escenario incluyen una superficie de  $10\text{ m}^2$ , una temperatura media de  $23.8^{\circ}\text{C}$ , una velocidad del viento de 30 m/s, una distancia de 0,5 metros entre paneles por fila y una separación de 1,5 metros entre paneles en cada columna.

Por otro lado, el escenario 2 tiene una minimización de pérdidas en función de la potencia simulada, menor que el escenario 1, con una eficiencia del 9.21% y una potencia total de salida de 663,15 W. Las condiciones para este escenario incluyen una superficie de  $10\text{ m}^2$  una temperatura media de  $44.8^{\circ}\text{C}$ , una velocidad del viento de 30 m/s, una distancia de 0,5 metros entre paneles por fila, y una separación de 1,5 metros entre paneles en cada columna. La menor refrigeración en el escenario 3 provocó temperaturas más altas y, en consecuencia, más pérdidas.

El escenario 3 tiene el valor más bajo de los tres escenarios, con una eficiencia del 7.93% y una potencia total de 570,78 W. Las condiciones para este escenario incluyen una superficie de  $10\text{ m}^2$ , una temperatura media de  $73,7^{\circ}\text{C}$ , una velocidad del viento de 30 m/s, una distancia de 0,5 metros entre paneles por fila y una separación de 1,5 metros entre paneles en cada columna. El escenario 1 presenta la mejor refrigeración, lo que se tradujo en la mayor cantidad de generación de energía en función de la potencia simulada.

Los resultados indican que, aunque las eficiencias de los tres escenarios son similares, existe una variación en la producción de energía en función de la temperatura inicial para cada caso. Es así como, la minimización de las pérdidas en función de la potencia simulada disminuye al aumentar la temperatura de los paneles fotovoltaicos, al igual que su rendimiento o eficiencia.

## CONCLUSIONES

El análisis de la temperatura se puede realizar utilizando las ecuaciones de Navier-Stokes, concretamente las ecuaciones de energía. Estas ecuaciones son esenciales para optimizar la generación de energía eléctrica en la fase inicial de diseño. Empleando estas ecuaciones, resulta factible analizar y comprender las características térmicas de los sistemas, mejorando así la eficiencia de la producción de energía.

El primer escenario demuestra una gran viabilidad en términos de producción de energía eléctrica y minimización de pérdidas de energía eléctrica vinculantes a su rendimiento y eficiencia. Se trata de un conjunto fotovoltaico compuesto por 12 paneles, con una separación de 1,5 m entre filas y de 0.5 m entre columnas. Los paneles están inclinados en un ángulo de  $35^\circ$  y funcionan con una velocidad del viento de 30 m/s y una temperatura media de  $26^\circ\text{C}$ . Esta configuración produce una potencia de 729,3 W, con un rendimiento del 10,13%. Cabe señalar que este rendimiento es superior al de los escenarios 2 y 3 respectivamente, a pesar de que todos los escenarios tienen el mismo número de paneles.

El tercer escenario resultó ser el menos favorable en términos de producción de energía y minimización de pérdidas. Presentaba una configuración con una separación de 1,5 m entre filas y 0,5 m entre columnas, una inclinación de  $35^\circ$  y una temperatura media de  $73,7^\circ\text{C}$ . Este escenario dio lugar a la producción de potencia eléctrica más baja, con una potencia de 570,78 W y una eficiencia de 7.93 %. La presencia de una temperatura inicial más alta ( $80^\circ\text{C} - 90^\circ\text{C}$ ), en comparación con los escenarios 1 y 2, contribuyó a estos resultados desfavorables.

El método más eficaz para minimizar las pérdidas causadas por los efectos térmicos consiste en distribuir el conjunto fotovoltaico con una separación significativa entre filas y columnas, además de mantener una temperatura inicial bajo.

Esta configuración mejora significativamente la refrigeración de cada panel, lo que se traduce en un mayor voltaje y un aumento de la potencia de salida. El escenario 1 demostró claramente este efecto, ya que el conjunto fotovoltaico con separación uniforme entre filas y columnas, y una temperatura inicial relativamente baja obtuvo los mejores resultados en términos de minimización de pérdidas y rendimiento general.

Con los datos de irradiación y los resultados obtenidos hay que considerar que existen otros factores también fundamentales que influyen en la eficiencia y funcionamiento de trabajo de los paneles fotovoltaicos. Siempre se intenta maximizar la generación de energía eléctrica en los paneles fotovoltaicos.

## RECOMENDACIONES

Es esencial tener en cuenta factores como la temperatura a la hora de diseñar y optimizar los sistemas de paneles solares para mejorar su eficiencia energética. La investigación constató que la eficiencia disminuye de manera sustancial a medida que aumenta la temperatura de los paneles fotovoltaicos. Por lo tanto, se recomienda diseñar y optimizar los sistemas de paneles solares con temperaturas iniciales más bajas para mejorar su eficiencia.

Se recomienda modelar los efectos térmicos utilizando ecuaciones que rijan el comportamiento térmico deseado relacionadas con la conservación de la masa, la segunda ley de Newton y la conservación de la energía. Este enfoque permite analizar la distribución de temperatura, así como el comportamiento del viento como medio de enfriamiento.

También es importante considerar variables adicionales, tales como: separación entre filas y columnas del arreglo del sistema y, el ángulo de inclinación de los paneles fotovoltaicos, pues en este caso específico, para fines prácticos, se utilizaron para los 3 escenarios los mismos parámetros, lo que permitió obtener los resultados esperados, sin embargo, se recomienda que a futuro, se pueda realizar un estudio donde se revise a detalle la incidencia de las variables mencionadas con respecto a la eficiencia y funcionamiento de trabajo de los paneles fotovoltaicos.

Debido al cambio climático a nivel mundial, en la cual las temperaturas ambientales tienen un aumento considerable, se recomienda, además, establecer importantes análisis y cálculos en la selectividad y diseños de paneles solares en función de tener un mejor rendimiento y eficiencia en el uso donde se prevea tener una mejor vida útil, prevención de incendios, menor cambio de accesorios y paneles,

menor mantenimiento, evitar puntos calientes, tener una mejor confiabilidad y seguridad del sistema.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aerodinámicas, D. E. C. (2013). *Simulación del flujo alrededor de paneles fotovoltaicos. Determinación de cargas aerodinámicas*. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Ahmadi, M. H., Baghban, A., Sadeghzadeh, M., Zamen, M., Mosavi, A., Shamshirband, S., Kumar, R., & Mohammadi-Khanaposhtani, M. (2020). Evaluation of electrical efficiency of photovoltaic thermal solar collector. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 14(1), 545–565.  
<https://doi.org/10.1080/19942060.2020.1734094>
- Ahmadi, M. H., Ghazvini, M., Sadeghzadeh, M., Alhuyi Nazari, M., Kumar, R., Naeimi, A., & Ming, T. (2018). Solar power technology for electricity generation: A critical review. *Energy Science and Engineering*, 6(5), 340–361. <https://doi.org/10.1002/ese3.239>
- Akbari, H., Browne, M. C., Ortega, A., Huang, M. J., Hewitt, N. J., Norton, B., & McCormack, S. J. (2018). Efficient energy storage technologies for photovoltaic systems. *Solar Energy*, 192(November 2017), 144–168.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.052>
- Ali, M., Ali, H. M., Moazzam, W., & Babar Saeed, M. (2015). Performance enhancement of PV cells through micro-channel cooling. *AIMS Energy*, 3(4), 699–710.  
<https://doi.org/10.3934/energy.2015.4.699>
- Anderson, K., Shafahi, M., Lakeh, R. B., Monemi, S., & McNamara, C. (2015). CFD study of compost waste heat for use in a hybrid solar tower. *2015 IEEE Conference on Technologies for Sustainability, SusTech 2015*, 73–76.  
<https://doi.org/10.1109/SusTech.2015.7314325>
- Assareh, E., Jafarian, M., Nedaei, M., Firoozzadeh, M., & Lee, M. (2022). Performance Evaluation and Optimization of a Photovoltaic/Thermal (PV/T) System according to Climatic Conditions. *Energies*, 15(20). <https://doi.org/10.3390/en15207489>
- Augusto, A., Herasimenka, S. Y., King, R. R., Bowden, S. G., & Honsberg, C. (2017). Analysis of the recombination mechanisms of a silicon solar cell with low bandgap-



voltage offset. *Journal of Applied Physics*, 121(20), 2–8.

<https://doi.org/10.1063/1.4984071>

- Badi, N., Theodore, A. M., Alghamdi, S. A., Alatawi, A. S., Almasoudi, A., Lakhout, A., Roy, A. S., & Ignatiev, A. (2022). Thermal effect on curved photovoltaic panels: Model validation and application in the Tabuk region. *PLoS ONE*, 17(11 November), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275467>
- Boutina, L., Lebbi, M., Touafek, K., Khelifa, A., & Benchatti, A. (2018). Numerical investigation of the natural air-cooling of photovoltaic modules in a new concept of hybrid system PVT mounted in stairs form (S-PVT). *2018 5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ICEEE 2018*, 468–472. <https://doi.org/10.1109/ICEEE2.2018.8391383>
- Browne, M. C., Norton, B., & McCormack, S. J. (2015). Phase change materials for photovoltaic thermal management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 762–782. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.050>
- Castillo, L. (2016). *Aerodynamic study of a photovoltaic solar tracker*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Cortés, C. L., Gómez, G. S., Betancur Londoño, F., Carvajal Quintero, S. X., & Guerrero González, N. (2020). Análisis experimental del desempeño de un sistema solar fotovoltaico con inversor centralizado y con microinversores: caso de estudio Manizales. *TecnoLógicas*, 23(47), 1–21. <https://doi.org/10.22430/22565337.1403>
- Cortés Cortés, C. L., Gómez Gómez, G. S., Betancur Londoño, F., Carvajal Quintero, S. X., & Guerrero González, N. (2020). Análisis experimental del desempeño de un sistema solar fotovoltaico con inversor centralizado y con microinversores: caso de estudio Manizales. *TecnoLógicas*, 23(47), 1–21. <https://doi.org/10.22430/22565337.1403>
- Deng, Y., Wang, W., & Ye, Q. (2023). Numerical analysis and optimization of the charging process on a shell - and - tube latent heat thermal energy storage unit for a solar power plant with direct steam generation. *Energy Science and Engineering*, June 2022, 206–226. <https://doi.org/10.1002/ese3.1323>

- Dev, A., Kumar, R., & Saini, R. P. (2022). Experimental evaluation of performance of a hybrid solar photovoltaic (PV/T) panel integrated with effective cooling solutions with water base nanofluids and phase change materials. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(3), 7287–7302.  
<https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2107732>
- Di Capua H, M., Escobar, R., Diaz, A. J., & Guzmán, A. M. (2018). Enhancement of the cooling capability of a high concentration photovoltaic system using microchannels with forward triangular ribs on sidewalls. *Applied Energy*, 226(May), 160–180.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.052>
- Doctorado, P. De, & Avanzados, M. (2017). *Desarrollo de un sistema de optimización de forma para perfiles aerodinámicos mediante algoritmos genéticos* (Vol. 2017, Issue cc). Universidad del País Vasco.
- Dutra Silva, D., Candido Reis, R., Rodrigues de Souza, R., Campos Silva, J. B., & Cardoso, E. M. (2019). *Thermal Analysis of a Photovoltaic System With Solar Tracking Mirrors*. November. <https://doi.org/10.26678/abcm.encit2018.cit18-0786>
- Feijoo, M. Á. Á., Fariña, M. E. A., Suárez-García, A., González-Peña, D., & Díez-Mediavilla, M. (2019). Compounds with epoxy resins and phase change materials for storage in solar applications. *Materials*, 12(21). <https://doi.org/10.3390/ma12213522>
- Graganiello, L., Iasiello, M., & Mauro, G. M. (2022). Multi-Objective Optimization of a Heat Sink for the Thermal Management of a Peltier-Cell-Based Biomedical Refrigerator. *Energies*, 15(19). <https://doi.org/10.3390/en15197352>
- Güemes, A., Fajardo, P., & Raiola, M. (2021). Experimental assessment of RANS models for wind load estimation over solar-panel arrays. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/app11062496>
- Hages, C. J., Carter, N. J., & Agrawal, R. (2016). Generalized quantum efficiency analysis for non-ideal solar cells. *Journal of Applied Physics*, 119(1).  
<https://doi.org/10.1063/1.4939487>
- Hernandez-Perez, J. G., Carrillo, J. G., Bassam, A., Flota-Banuelos, M., & Patino-Lopez, L.

- D. (2020). A new passive PV heatsink design to reduce efficiency losses: A computational and experimental evaluation. *Renewable Energy*, *147*, 1209–1220.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.088>
- Hocine, R., Belkacemi, K., & Kheris, D. (2019). 3D-analytical method analysis of thermal effect in space shaded solar panel. *Proceedings of 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, RAST 2019*, 339–344.  
<https://doi.org/10.1109/RAST.2019.8767772>
- Houssamo, I., Locment, F., & Sechilariu, M. (2010). Maximum power tracking for photovoltaic power system: Development and experimental comparison of two algorithms. *Renewable Energy*, *35*(10), 2381–2387.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.04.006>
- Huang, Z. Y., Liu, Y. J., Chen, Y. Q., & Peng, Z. L. (2015). Energy structure of MHD flow coupling with outer resistance circuit. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, *387*, 186–201. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.04.001>
- Jubayer, C. M., Siddiqui, K., & Hangan, H. (2016). CFD analysis of convective heat transfer from ground mounted solar panels. *Solar Energy*, *133*, 556–566.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.027>
- Kant, K., Pitchumani, R., Shukla, A., & Sharma, A. (2019). Analysis and design of air ventilated building integrated photovoltaic (BIPV) system incorporating phase change materials. *Energy Conversion and Management*, *196*(May), 149–164.  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.073>
- Kazem, H. A. (2019). Evaluation and analysis of water-based photovoltaic/thermal (PV/T) system. *Case Studies in Thermal Engineering*, *13*(December 2018), 100401.  
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100401>
- Kazemian, A., basati, Y., Khatibi, M., & Ma, T. (2021). Performance prediction and optimization of a photovoltaic thermal system integrated with phase change material using response surface method. *Journal of Cleaner Production*, *290*, 125748.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125748>

- Kenu E. Sarah. (2020). A Review of Solar Photovoltaic Technologies. *International Journal of Engineering Research And*, V9(07), 741–749.  
<https://doi.org/10.17577/ijertv9is070244>
- Khaki, M., Shahsavari, A., Khanmohammadi, S., & Salmanzadeh, M. (2017). Energy and exergy analysis and multi-objective optimization of an air based building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) system. *Solar Energy*, 158(August 2016), 380–395.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.09.056>
- Liu, Z., Wei, T., Wu, D., Zhang, Y., Li, G., & Yang, X. (2021). Performance Evaluation and Optimization of a Novel System Combining a Photovoltaic/Thermal Subsystem & an Organic Rankine Cycle Driven by Solar Parabolic Trough Collector. *Journal of Thermal Science*, 30(5), 1513–1525. <https://doi.org/10.1007/s11630-021-1503-7>
- Maatallah, T., & Youssef, W. Ben. (2019). Simulation and performance analysis of concentrating photovoltaic/thermal collector (CPV/T) with three-sided thermal insulation based on coupled optothermal model. *Solar Energy*, 181(October 2018), 308–324. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.002>
- Marrakchi, S., Leemrani, Z., Asselman, H., Aoukili, A., & Asselman, A. (2018). Temperature distribution analysis of parabolic trough solar collector using CFD. *Procedia Manufacturing*, 22, 773–779. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.110>
- Ming, T., Xu, G., Pan, Y., Meng, F., & Zhou, C. (2016). Fluid flow and heat transfer of solar chimney power plant. In *Solar Chimney Power Plant Generating Technology*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805370-6.00004-1>
- Neill, S. P., Angeloudis, A., Robins, P. E., Walkington, I., Ward, S. L., Masters, I., Lewis, M. J., Piano, M., Avdis, A., Piggott, M. D., Aggidis, G., Evans, P., Adcock, T. A. A., Židonis, A., Ahmadian, R., & Falconer, R. (2018). Tidal range energy resource and optimization – Past perspectives and future challenges. *Renewable Energy*, 127, 763–778. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.007>
- Ohkitani, K. (2017). Characterization of blowup for the Navier-Stokes equations using vector potentials. *AIP Advances*, 7(1), 015211. <https://doi.org/10.1063/1.4975406>

- Ömeroğlu, G. (2018). CFD analysis and electrical efficiency improvement of a hybrid PV/T panel cooled by forced air circulation. *International Journal of Photoenergy*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/9139683>
- Prakash, S. V. J. (2022). Analysis of slope and azimuth angle of solar panel with different solar trackers. *2022 International Virtual Conference on Power Engineering Computing and Control: Developments in Electric Vehicles and Energy Sector for Sustainable Future (PECCON)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/PECCON55017.2022.9851083>
- Romero Jacobo. (2015). *Análisis del funcionamiento de paneles fotovoltaicos y su utilización en las regiones de la costa y sierra del Ecuador. Caso de estudio: Biblioteca Pompeu Fabra de Mataró*. 1–118.
- Santos, E. S. dos, Nunes, M. V. A., Nascimento, M. H. R., & Leite, J. C. (2022). Rational Application of Electric Power Production Optimization through Metaheuristics Algorithm. *Energies*, 15(9), 3253. <https://doi.org/10.3390/en15093253>
- Santos, F. da R., Mariano, J. D., Sestrem Junior, J. A., & Urbanetz Junior, J. (2019). Analysis of solar photovoltaic energy potential in Brazilian hydroelectric reservoirs through floating panels. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 62(spe). <https://doi.org/10.1590/1678-4324-smart-2019190012>
- Sarafraz, M. M., Safaei, M. R., Leon, A. S., Tlili, I., Alkanhal, T. A., Tian, Z., Goodarzi, M., & Arjomandi, M. (2019). Experimental investigation on thermal performance of a PV/T-PCM (photovoltaic/thermal) system cooling with a PCM and nanofluid. *Energies*, 12(13), 1–16. <https://doi.org/10.3390/en12132572>
- Sellami, A., Elotmani, R., Kandoussi, K., Eljouad, M., Hajjaji, A., & Boutaous, M. (2016). Temperature regulation of PV solar cell under PCM cooling system. *Proceedings of 2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2016*, 580–584. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2016.7983881>
- Singh, S., Agarwal, S., Tiwari, G. N., & Chauhan, D. (2015). Application of genetic algorithm with multi-objective function to improve the efficiency of glazed

- photovoltaic thermal system for New Delhi (India) climatic condition. *Solar Energy*, 117, 153–166. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.04.025>
- Sohani, A., Dehnavi, A., Sayyaadi, H., Hoseinzadeh, S., Goodarzi, E., Garcia, D. A., & Groppi, D. (2022). The real-time dynamic multi-objective optimization of a building integrated photovoltaic thermal (BIPV/T) system enhanced by phase change materials. *Journal of Energy Storage*, 46, 103777. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103777>
- SOLAREX. (2019). *MSX-60 and MSX-64 Photovoltaic Modules* (Issue 301).
- Sun, K., Yan, C., Liu, F., Huang, J., Zhou, F., Stride, J. A., Green, M., & Hao, X. (2016). Over 9% Efficient Kesterite Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> Solar Cell Fabricated by Using Zn<sub>1-x</sub>CdxS Buffer Layer. *Advanced Energy Materials*, 6(12), 4–9. <https://doi.org/10.1002/aenm.201600046>
- Tawheed Kibria, M., MAHMUD Sonyy, S., Ahammed, A., Mahmud Sony, S., & Hossain, F. (2014). A Review: Comparative studies on different generation solar cells technology Investigation of Magnetic Dead Layer View project Solar Dryer View project A Review: Comparative studies on different generation solar cells technology. *Proc. of 5th International Conference on Environmental Aspects of Bangladesh, March 2015*, 51–53. <https://www.researchgate.net/publication/274195294>
- Teo, H., Lee, P., & Hawlader, M. (2012). An active cooling system for photovoltaic modules. *Applied Energy*, 90(1), 309–315. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.017>
- Vera, J., Laukkanen, T., & Sirén, K. (2014). Multi-objective optimization of hybrid photovoltaic-thermal collectors integrated in a DHW heating system. *Energy and Buildings*, 74, 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.011>
- Xiao, D., & Liu, T. (2022). Optimized photovoltaic system for improved electricity conversion. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 17, 456–461. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctab103>
- Yfantis, E. (2017). An intelligent robots-server system for solar panel cleaning and electric power output optimization. *International Robotics & Automation Journal*, 3(5), 343–

345. <https://doi.org/10.15406/iratj.2017.03.00066>

## Glosario de términos

**Fotovoltaico:** Relacionado con la conversión directa de luz solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico.

**Paneles solares:** Dispositivos que convierten la energía solar en electricidad utilizando el efecto fotovoltaico. Están compuestos por celdas solares interconectadas.

**Celdas solares:** Dispositivos semiconductoras que convierten la luz solar directamente en electricidad.

**Silicio:** Elemento químico ampliamente utilizado en la fabricación de celdas solares.

**Irradiancia:** Densidad de potencia incidente de la radiación electromagnética solar que llega a una superficie. Se mide en  $W/m^2$ .

**Radiación:** Transferencia de energía por medio de ondas electromagnéticas. La radiación solar llega a la Tierra en forma de luz visible, infrarroja y ultravioleta.

**Efecto fotovoltaico:** Fenómeno físico por el que un material genera una diferencia de potencial al absorber fotones de luz. Se utiliza en las celdas solares.

**Semiconductor:** Material que posee una conductividad eléctrica intermedia entre los conductores y los aislantes. El silicio es un semiconductor.

**Unión PN:** Región de transición entre materiales semiconductoras tipo P y tipo N. Permite separar los portadores de carga en una celda solar.

**Eficiencia:** En una celda solar, es la fracción de energía solar incidente que se convierte en electricidad.

**Factor de idealidad:** Parámetro que relaciona el comportamiento real de un diodo con su comportamiento teórico ideal.

**Ecuaciones de Navier-Stokes:** Ecuaciones diferenciales que describen el movimiento de fluidos newtonianos. Se utilizan en mecánica de fluidos.

**CFD:** Dinámica de fluidos computacional. Técnicas numéricas para simular interacciones de fluidos.

**Convección:** Mecanismo de transferencia de calor en el que intervienen flujos macroscópicos dentro de un fluido.

**Conducción:** Transferencia de calor a través de un medio estacionario debido a interacciones microscópicas.

**Radiación:** Transferencia de energía en forma de ondas electromagnéticas sin necesidad de un medio.

**Colector solar:** Dispositivo que absorbe la radiación solar y la transfiere en forma de calor a un fluido de trabajo.



## Acrónimos

PV - Fotovoltaica

PCM - Material de cambio de fase

PV/T - Térmica fotovoltaica

BIPV/T: Térmica fotovoltaica integrada en edificios

PVT/PCM: Térmica fotovoltaica con material de cambio de fase

CFD: dinámica de fluidos computacional

ORC: ciclo orgánico de Rankine

CCP: colector parabólico compuesto

GHI: irradiancia horizontal global

MPP: punto de máxima potencia

I-V: corriente-tensión

Voc: tensión en circuito abierto

Isc: corriente de cortocircuito

FF: Factor de llenado

MOEA/D - Algoritmo evolutivo multiobjetivo basado en la descomposición

MOPSO: Optimización multiobjetivo por enjambre de partículas

LSSVM: máquina de vectores soporte por mínimos cuadrados (Least Squares Support Vector Machine)

RBF-ANN - Red neuronal artificial de función de base radial

MLP-ANN - Red neuronal artificial perceptrón multicapa

ANFIS - Sistema de Inferencia Neuro Difusa Adaptativa (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System)

RSM - Metodología de superficie de respuesta

Isc - Corriente de cortocircuito

Voc - Tensión de circuito abierto

Io - Corriente de saturación inversa

q - Carga elemental (carga del electrón)

k - Constante de Boltzmann

T - Temperatura absoluta

n - Factor de idealidad

IL - Corriente de carga  
Rs - Resistencia en serie  
Rp - Resistencia en paralelo  
Pout - Potencia de salida  
Imax - Corriente máxima  
Vmax - Tensión máxima  
 $\eta$  - Eficiencia  
FF - Factor de llenado  
VL - Temperatura en la base  
VU - Temperatura en la parte superior  
Te - Temperatura ambiente  
z - Coordenada vertical  
h - Distancia entre la base y la parte superior  
Nu - Velocidad del fluido  
K - Coeficiente de proporcionalidad  
 $\Delta n$  - Exceso de concentración de portadores  
NA - Concentración de dopaje  
 $n_i$  - Concentración intrínseca de portadores

## Anexos

### Programación en software MatLAB

#### Cálculo de voltajes, corrientes y potencias según las ecuaciones

```
%% Solar electrical model based on Shockley diode equation
clear all
clc
close all
%% lectura de datos de simulacion CFD Autodesk
% [LIBRO DIR]= uigetfile('*.xlsx','archivo de excel');
% wai=waitbar(0,'Por favor espere');
% resultados=xlsread(strcat(DIR,LIBRO),1);
% waitbar(0.5,wai)
% waitbar(1,wai)
% close(wai)
%% Parametrizacion de voltaje de circuito abierto, irradiancia y
temperatura de referencia.
    name='escenario 3_5'
% resultados=resultados(:,6);
% resultados=sum(resultados)/length(resultados);
Va=0:.01:25;
Suns=.2:.2:1;
TaC=24.68;
% TaC=resultados;
%% Cálculo de Voltajes, corrientes y potencias segun las ecuaciones
caracteristicas.
Ipv=zeros(size(Va));
Ppv=zeros(size(Va));
for s=1:1:length(Suns)
for i=1:1:length(Va)
k=1.38e-23;
q=1.6e-19;
A=1.2;
Vg=1.12;
Ns=36;

T1=273+25;
Voc_T1=21.06/Ns;
Isc_T1=3.80;

T2=273+75;
Voc_T2=17.05/Ns;
Isc_T2=3.92;

TarK=273+TaC;
Tref=273+25;
%{
Va=0;
Iph_T1=Isc_T1;
%}
Iph_T1=Isc_T1*Suns(s);
a=(Isc_T2-Isc_T1)/Isc_T1*1/(T2-T1);
Iph=Iph_T1*(1+a*(TarK-T1));

Vt_T1=k*T1/q;
Ir_T1=Isc_T1/(exp(Voc_T1/(A*Vt_T1))-1);
```

```

Ir_T2=Isc_T2/(exp(Voc_T2/(A*Vt_T1))-1);
b=Vg*q/(A*k);
Ir=Ir_T1*(TarK/T1).^3/A.*exp(-b.*(1./TarK-1/T1));
X2v=Ir_T1/(A*Vt_T1)*exp(Voc_T1/(A*Vt_T1));
dVdI_Voc=-1.15/Ns/2;
Rs=-dVdI_Voc-1/X2v;
%Ia=1:0.01:Iph;
Vt-Ta=A*k*TarK/q;
%{
Ia1=Iph-Ir*(exp((Vc+Ia*Rs)/Vt-Ta)-1);
solve for I: f(Ia)=Iph-Ia-Ir*(exp((Vc+Ia*Rs)/Vt-Ta)-1)=0;
Newton raphson Ia2=Ia1-f(Ia1)/f'(Ia1)
%}
Vc=Va(i)/Ns;
Ia=zeros(size(Vc));
%Iav=Ia
for j=1:1:10
    Ia=Ia-(Iph-Ia-Ir*(exp((Vc+Ia*Rs)/Vt-Ta)-1))./(-1-
    Ir*(exp((Vc+Ia*Rs)/Vt-Ta)-1).*Rs/Vt-Ta);
end
Ipv(s,i)=Ia;
Ppv(s,i)=Va(i)*Ipv(s,i);
end
end
Ia=real(Ia);
Ipv=real(Ipv);
Ppv=real(Ppv);
%% Halla maxima potencia de cada caso
m1=max(Ppv(1,:));
m2=max(Ppv(2,:));
m3=max(Ppv(3,:));
m4=max(Ppv(4,:));
m5=max(Ppv(5,:));
%% Halla el voltaje y la corriente de maxima potencia
ineedX = find(Ppv(1,)==m1);
cm1 = Ipv(1,ineedX); % corriente de maxima potencia
vm1 = Va(1,ineedX); % voltaje de maxima potencia

ineedX = find(Ppv(2,)==m2);
cm2 = Ipv(2,ineedX); % corriente de maxima potencia
vm2 = Va(1,ineedX); % voltaje de maxima potencia

ineedX = find(Ppv(3,)==m3);
cm3 = Ipv(3,ineedX); % corriente de maxima potencia
vm3 = Va(1,ineedX); % voltaje de maxima potencia

ineedX = find(Ppv(4,)==m4);
cm4 = Ipv(4,ineedX); % corriente de maxima potencia
vm4 = Va(1,ineedX); % voltaje de maxima potencia

ineedX = find(Ppv(5,)==m5);
cm5 = Ipv(5,ineedX); % corriente de maxima potencia
vm5 = Va(1,ineedX); % voltaje de maxima potencia
%% Conversiones a string
m1=num2str(m1);
m2=num2str(m2);
m3=num2str(m3);
m4=num2str(m4);
m5=num2str(m5);

```

```

cm1=num2str(cm1);
cm2=num2str(cm2);
cm3=num2str(cm3);
cm4=num2str(cm4);
cm5=num2str(cm5);

vm1=num2str(vm1);
vm2=num2str(vm2);
vm3=num2str(vm3);
vm4=num2str(vm4);
vm5=num2str(vm5);

%% figure properties
axes1 = axes('Parent',figure(1),'OuterPosition',[0 0.5 1 0.5]);
    xlim(axes1,[0 23]);
    ylim(axes1,[0 5]);
box(axes1,'on');
grid(axes1,'on');
hold(axes1,'all');
title('I-V charateristics at 25 C');
xlabel('V_p_v (V)');
ylabel('I_p_v (A)');
plot1 = plot(Va(1,:),Ipv(:,:),'Parent',axes1,'LineWidth',1.5);
set(plot1(1),'DisplayName','0.2 Sun');
set(plot1(2),'DisplayName','0.4 Sun');
set(plot1(3),'DisplayName','0.6 Sun');
set(plot1(4),'DisplayName','0.8 Sun');
set(plot1(5),'DisplayName','1.0 Sun');
axes2 = axes('OuterPosition',[0 0 1 0.5]);
    xlim(axes2,[0 23]);
    ylim(axes2,[0 70]);
box(axes2,'on');
grid(axes2,'on');
hold(axes2,'all');
title('P-V charateristics at 25 C');
xlabel('V_p_v (V)');
ylabel('P_p_v (W)');
plot2 = plot(Va(1,:),Ppv(:,:),'Parent',axes2,'LineWidth',1.5);
set(plot2(1),'DisplayName','0.2 Sun');
set(plot2(2),'DisplayName','0.4 Sun');
set(plot2(3),'DisplayName','0.6 Sun');
set(plot2(4),'DisplayName','0.8 Sun');
set(plot2(5),'DisplayName','1.0 Sun');
legend1 = legend(axes1,'show');
set(legend1,...
    'Position',[0.791450219003363 0.769901214241614 0.0793528505392912
0.151937984496124]);
legend2 = legend(axes2,'show');
set(legend2,...
    'Position',[0.189976911157747 0.248883515126569 0.0793528505392912
0.151937984496124]);
annotation('textbox',...
    [0.47380281690141 0.811076083153806 0.107858243451464
0.0434108527131783],...
    'String',{strcat(cm4,' A @',vm4,' V')},...
    'FitBoxToText','on',...
    'EdgeColor','none');
annotation('textbox',...

```

```

    [0.474084507042255 0.7513476657742 0.110939907550077
0.0434108527131783],...
    'String',{strcat(cm3,' A @',vm3,' V')},...
    'FitBoxToText','on',...
    'EdgeColor','none');
annotation('textbox',...
    [0.472951770026098 0.700468805916718 0.110939907550077
0.0434108527131783],...
    'String',{strcat(cm2,' A @',vm2,' V')},...
    'FitBoxToText','on',...
    'EdgeColor','none');
annotation('textbox',...
    [0.47323943661972 0.642464055322894 0.110939907550077
0.0434108527131783],...
    'String',{strcat(cm1,' A @',vm1,' V')},...
    'FitBoxToText','on',...
    'EdgeColor','none');
annotation('textbox',...
    [0.635833014827347 0.0980360187780262 0.122362869198312
0.066350710900474],...
    'String',{strcat(m1,' W')},...
    'FitBoxToText','on',...
    'EdgeColor','none');
annotation('textbox',...
    [0.632873485499481 0.379556028485233 0.120599829638874
0.066350710900474],...
    'String',{strcat(m5,' W')},...
    'FitBoxToText','on',...
    'EdgeColor','none');
annotation('textbox',...
    [0.633492332194277 0.307167067364569 0.118572532239852
0.0663507109004739],...
    'String',{strcat(m4,' W')},...
    'FitBoxToText','on',...
    'EdgeColor','none');
annotation('textbox',...
    [0.632395285780775 0.238358964716038 0.122362869198312
0.066350710900474],...
    'String',{strcat(m3,' W')},...
    'FitBoxToText','on',...
    'EdgeColor','none');
annotation('textbox',...
    [0.634117121719049 0.167164307824055 0.122362869198312
0.066350710900474],...
    'String',{strcat(m2,' W')},...
    'FitBoxToText','on',...
    'EdgeColor','none');
annotation('textbox',...
    [0.480299619499175 0.859929518844724 0.184507042253521
0.0665083135391924],...
    'String',{strcat(cm5,' A @',vm5,' V')},...
    'FitBoxToText','on',...
    'EdgeColor','none');
%% Potencia total del arreglo
figure(2)
plot3=plot(Va(1,:),Ppv(:,:)*3,'LineWidth',1.5)
hold on
box on

```

```

title(strcat('Curva característica P-V @ ', string(TaC), '
°C'), 'FontSize',15, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'b')
xlim([0 23]);
ylim([0 190]);
xlabel('V_p_v (V)', 'FontSize',15, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'b')
ylabel('P_p_v (W)', 'FontSize',15, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'b')
set(plot3(1), 'DisplayName', '0.2 Sun');
set(plot3(2), 'DisplayName', '0.4 Sun');
set(plot3(3), 'DisplayName', '0.6 Sun');
set(plot3(4), 'DisplayName', '0.8 Sun');
set(plot3(5), 'DisplayName', '1.0 Sun');
grid minor
legend show
plot3(6)=plot(str2num(vm1), str2num(m1)*3, 'o', 'MarkerSize',10);
plot3(7)=plot(str2num(vm2), str2num(m2)*3, 'o', 'MarkerSize',10);
plot3(8)=plot(str2num(vm3), str2num(m3)*3, 'o', 'MarkerSize',10);
plot3(9)=plot(str2num(vm4), str2num(m4)*3, 'o', 'MarkerSize',10);
plot3(10)=plot(str2num(vm5), str2num(m5)*3, 'o', 'MarkerSize',10);
set(plot3(6), 'DisplayName', strcat(num2str(str2num(m1)*3), ' W'));
set(plot3(7), 'DisplayName', strcat(num2str(str2num(m2)*3), ' W'));
set(plot3(8), 'DisplayName', strcat(num2str(str2num(m3)*3), ' W'));
set(plot3(9), 'DisplayName', strcat(num2str(str2num(m4)*3), ' W'));
set(plot3(10), 'DisplayName', strcat(num2str(str2num(m5)*3), ' W'));
print ( strcat('potencia_total_', name) , '-dmeta' , '-r1366' )
%% Curva individual I-V
figure(3)
plot3=plot(Va(1,:), Ipv(:, :), 'LineWidth',1.5)
hold on
box on
title(strcat('Curva característica I-V @ ', string(TaC), '
°C'), 'FontSize',15, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'b')
xlim([0 23]);
ylim([0 5]);
xlabel('V_p_v (V)', 'FontSize',15, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'b')
ylabel('I_p_v (A)', 'FontSize',15, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'b')
set(plot3(1), 'DisplayName', '0.2 Sun');
set(plot3(2), 'DisplayName', '0.4 Sun');
set(plot3(3), 'DisplayName', '0.6 Sun');
set(plot3(4), 'DisplayName', '0.8 Sun');
set(plot3(5), 'DisplayName', '1.0 Sun');
grid minor
legend show
plot3(6)=plot(str2num(vm1), str2num(cm1), 'o', 'MarkerSize',10);
plot3(7)=plot(str2num(vm2), str2num(cm2), 'o', 'MarkerSize',10);
plot3(8)=plot(str2num(vm3), str2num(cm3), 'o', 'MarkerSize',10);
plot3(9)=plot(str2num(vm4), str2num(cm4), 'o', 'MarkerSize',10);
plot3(10)=plot(str2num(vm5), str2num(cm5), 'o', 'MarkerSize',10);
set(plot3(6), 'DisplayName', strcat(cm1, ' A @', vm1, ' V'));
set(plot3(7), 'DisplayName', strcat(cm2, ' A @', vm2, ' V'));
set(plot3(8), 'DisplayName', strcat(cm3, ' A @', vm3, ' V'));
set(plot3(9), 'DisplayName', strcat(cm4, ' A @', vm4, ' V'));
set(plot3(10), 'DisplayName', strcat(cm5, ' A @', vm5, ' V'));
print ( strcat('Curva V_I', name) , '-dmeta' , '-r1366' )

%% Potencia por panel
figure(4)
plot3=plot(Va(1,:), Ppv(:, :), 'LineWidth',1.5)
hold on
box on

```

```

title(strcat('Curva característica P-V @ ', string(TaC), '
°C'), 'FontSize',15, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'b')
xlim([0 23]);
ylim([0 65]);
xlabel('V_p_v (V)', 'FontSize',15, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'b')
ylabel('P_p_v (W)', 'FontSize',15, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'b')
set(plot3(1), 'DisplayName', '0.2 Sun');
set(plot3(2), 'DisplayName', '0.4 Sun');
set(plot3(3), 'DisplayName', '0.6 Sun');
set(plot3(4), 'DisplayName', '0.8 Sun');
set(plot3(5), 'DisplayName', '1.0 Sun');
grid minor
legend show

plot3(6)=plot(str2num(vm1), str2num(m1), 'o', 'MarkerSize',10);
plot3(7)=plot(str2num(vm2), str2num(m2), 'o', 'MarkerSize',10);
plot3(8)=plot(str2num(vm3), str2num(m3), 'o', 'MarkerSize',10);
plot3(9)=plot(str2num(vm4), str2num(m4), 'o', 'MarkerSize',10);
plot3(10)=plot(str2num(vm5), str2num(m5), 'o', 'MarkerSize',10);
set(plot3(6), 'DisplayName', strcat(num2str(str2num(m1)), ' W'));
set(plot3(7), 'DisplayName', strcat(num2str(str2num(m2)), ' W'));
set(plot3(8), 'DisplayName', strcat(num2str(str2num(m3)), ' W'));
set(plot3(9), 'DisplayName', strcat(num2str(str2num(m4)), ' W'));
set(plot3(10), 'DisplayName', strcat(num2str(str2num(m5)), ' W'));
print ( strcat("pot_per_panel_",name) , '-dmeta' , '-r1366' )
%% Factor de llenado
figure(5)
% plot3=plot(Va(1,:), Ppv(5,:), 'LineWidth',1.5)
plot3=plot(Va(1,:), Ipv(5,:), 'LineWidth',2)
labels = {'Pmax'};
hold on
plot2(1)=plot([0 str2num(vm5)], [str2num(cm5)
str2num(cm5)], 'b', 'LineWidth',2, 'HandleVisibility', 'off')
plot2(2)=plot([str2num(vm5) str2num(vm5)], [str2num(cm5)
0], 'b', 'LineWidth',2, 'HandleVisibility', 'off')
plot2(3)=plot(str2num(vm5), str2num(cm5), 'o', 'MarkerSize',10);
text(str2num(vm5), str2num(cm5), labels, 'VerticalAlignment', 'bottom', 'Horizo
ntalAlignment', 'left', 'FontSize',12, 'LineWidth',2)
%plot2(2)=plot([center1(1,1) dgx1(2)], [center1(1,2)
dgy1(2)], 'b', 'LineWidth',2, 'HandleVisibility', 'off')
% plot3=plot(Va(1,:), Ipv(5,:), 'LineWidth',1.5)
box on
%title(strcat('Factor de llenado
(FF)'), 'FontSize',15, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'b')
title(strcat('Factor de llenado (FF)@ ', string(TaC), '
°C'), 'FontSize',15, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'b')
xlim([0 23]);
ylim([0 5]);
xlabel('V_p_v (V)', 'FontSize',15, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'b')
ylabel('I_p_v (A)', 'FontSize',15, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'b')
grid minor
% print ( strcat("ff_",name) , '-dmeta' , '-r1366' )

```



## Cálculo de voltaje y corriente de máxima potencia

```
% Solar electrical model based on Shockley diode equation
clear all
clc
close all
Va=0:.01:22;
Suns=1;

%TaC=25:2:33;
%TaC=[25 25.9 26.5 27.5];%%primer escenario
%TaC=[25 25.5 25.6 25.7];%%segundo escenario
TaC=[25 25.6 25.9 26 26.3];%%tercer escenario
lva=length(Va);
%lsuns=length(Suns);
lT=length(TaC);

Ipv=zeros(size(Va));
% for s=1:1:lsuns
for s=1:1:lT
for i=1:1:lva
k=1.38e-23;
q=1.6e-19;
A=1.2;
Vg=1.12;
Ns=36;
T1=273+25;
Voc_T1=21.06/Ns;
Isc_T1=3.80;
T2=273+75;
Voc_T2=17.05/Ns;
Isc_T2=3.92;
TarK=273+TaC(s);
Tref=273+25;
Iph_T1=Isc_T1*Suns;
a=(Isc_T2-Isc_T1)/Isc_T1*1/(T2-T1);
Iph=Iph_T1*(1+a*(TarK-T1));
Vt_T1=k*T1/q;
Ir_T1=Isc_T1/(exp(Voc_T1/(A*Vt_T1))-1);
Ir_T2=Isc_T2/(exp(Voc_T2/(A*Vt_T1))-1);
b=Vg*q/(A*k);
Ir=Ir_T1*(TarK/T1).^(3/A).*exp(-b.*(1./TarK-1/T1));
X2v=Ir_T1/(A*Vt_T1)*exp(Voc_T1/(A*Vt_T1));
dVdI_Voc=-1.15/Ns/2;
Rs=-dVdI_Voc-1/X2v;
Vt_Ta=A*k*TarK/q;
Vc=Va(i)/Ns;
Ia=zeros(size(Vc));
for j=1:1:100
Ia=Ia-(Iph-Ia-Ir*(exp((Vc+Ia*Rs)/Vt_Ta)-1))./(-1-
Ir*(exp((Vc+Ia*Rs)/Vt_Ta)-1).*Rs/Vt_Ta);
end
Ipv(s,i)=Ia;
Ppv(s,i)=Va(i)*Ia;
end
end
Ia=real(Ia);
Ipv=real(Ipv);
Ppv=real(Ppv);
```

```

%% Halla maxima potencia de cada caso
m1=max(Ppv(1,:));
m2=max(Ppv(2,:));
m3=max(Ppv(3,:));
m4=max(Ppv(4,:));
m5=max(Ppv(5,:));
%% Halla el voltaje y la corriente de maxima potencia
ineedX = find(Ppv(1,)==m1);
cm1 = Ipv(1,ineedX); % corriente de maxima potencia
vm1 = Va(1,ineedX); % voltaje de maxima potencia

ineedX = find(Ppv(2,)==m2);
cm2 = Ipv(2,ineedX); % corriente de maxima potencia
vm2 = Va(1,ineedX); % voltaje de maxima potencia

ineedX = find(Ppv(3,)==m3);
cm3 = Ipv(3,ineedX); % corriente de maxima potencia
vm3 = Va(1,ineedX); % voltaje de maxima potencia

ineedX = find(Ppv(4,)==m4);
cm4 = Ipv(4,ineedX); % corriente de maxima potencia
vm4 = Va(1,ineedX); % voltaje de maxima potencia

ineedX = find(Ppv(5,)==m5);
cm5 = Ipv(5,ineedX); % corriente de maxima potencia
vm5 = Va(1,ineedX); % voltaje de maxima potencia
%% Conversiones a string
m1=num2str(m1);
m2=num2str(m2);
m3=num2str(m3);
m4=num2str(m4);
m5=num2str(m5);

cm1=num2str(cm1);
cm2=num2str(cm2);
cm3=num2str(cm3);
cm4=num2str(cm4);
cm5=num2str(cm5);

vm1=num2str(vm1);
vm2=num2str(vm2);
vm3=num2str(vm3);
vm4=num2str(vm4);
vm5=num2str(vm5);
% %% Figure properties
% axes1 = axes('Parent',figure,'OuterPosition',[0 0.5 1 0.5]);
% xlim(axes1,[0 23]);
% ylim(axes1,[0 5]);
% box(axes1,'on');
% grid(axes1,'on');
% hold(axes1,'all');
% title('I-V charateristics at 25 C');
% xlabel('V_p_v (V)');
% ylabel('I_p_v (A)');
% plot1 = plot(Va(1,:),Ipv(:,:),'Parent',axes1,'LineWidth',1.5);
% set(plot1(1),'DisplayName','25C T');
% set(plot1(2),'DisplayName','35C T');
% set(plot1(3),'DisplayName','45C T');
% set(plot1(4),'DisplayName','55C T');

```

```

% set(plot1(5),'DisplayName','65C T');
% axes2 = axes('OuterPosition',[0 0 1 0.5]);
% xlim(axes2,[0 23]);
% ylim(axes2,[0 70]);
% box(axes2,'on');
% grid(axes2,'on');
% hold(axes2,'all');
% title('P-V charateristics at 25 C');
% xlabel('V_p_v (V)');
% ylabel('P_p_v (W)');
% plot2 = plot(Va(1,:),Ppv(:,:),'Parent',axes2,'LineWidth',1.5);
% set(plot2(1),'DisplayName','25C T');
% set(plot2(2),'DisplayName','35C T');
% set(plot2(3),'DisplayName','45C T');
% set(plot2(4),'DisplayName','55C T');
% set(plot2(5),'DisplayName','65C T');
% legend1 = legend(axes2,'show');
% set(legend1,...
%     'Position',[0.142649065260064 0.288888888888888 0.106317411402157
0.151937984496124]);
% legend2 = legend(axes1,'show');
% set(legend2,...
%     'Position',[0.140359086340159 0.603617571059427 0.101694915254237
0.151937984496124]);
%% Curva individual I-V
figure(3)
plot3=plot(Va(1,:),Ipv(:,:),'LineWidth',1.5)
hold on
box on
title(strcat('Curva I-V a irradiancia solar de ', string(Suns),'
kw/m^2'),'FontSize',15,'FontWeight','bold','Color','b')
xlim([0 23]);
ylim([0 5]);
xlabel('V_p_v (V)','FontSize',15,'FontWeight','bold','Color','b')
ylabel('I_p_v (A)','FontSize',15,'FontWeight','bold','Color','b')
set(plot3(1),'DisplayName',strcat(string(TaC(1)),' °C'));
set(plot3(2),'DisplayName',strcat(string(TaC(2)),' °C'));
set(plot3(3),'DisplayName',strcat(string(TaC(3)),' °C'));
set(plot3(4),'DisplayName',strcat(string(TaC(4)),' °C'));
set(plot3(5),'DisplayName',strcat(string(TaC(5)),' °C'));
grid minor
legend show
legend('Location','southwest')
legend('NumColumns',2)
plot3(6)=plot(str2num(vm1),str2num(cm1),'o','MarkerSize',10);
plot3(7)=plot(str2num(vm2),str2num(cm2),'o','MarkerSize',10);
plot3(8)=plot(str2num(vm3),str2num(cm3),'o','MarkerSize',10);
plot3(9)=plot(str2num(vm4),str2num(cm4),'o','MarkerSize',10);
plot3(10)=plot(str2num(vm5),str2num(cm5),'o','MarkerSize',10);
set(plot3(6),'DisplayName',strcat(cm1,' A @',vm1,' V'));
set(plot3(7),'DisplayName',strcat(cm2,' A @',vm2,' V'));
set(plot3(8),'DisplayName',strcat(cm3,' A @',vm3,' V'));
set(plot3(9),'DisplayName',strcat(cm4,' A @',vm4,' V'));
set(plot3(10),'DisplayName',strcat(cm5,' A @',vm5,' V'));
%print ( strcat('Curva V_I',name) , '-dmeta' , '-r1366' )
%magnifyOnFigure()
%% Potencia por panel
figure(4)
plot3=plot(Va(1,:),Ppv(:,:),'LineWidth',1.5)

```

```

hold on
box on
title(strcat('Curva P-V a irradiancia solar de ', string(Suns), '
kw/m^2'), 'FontSize',15, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'b')
xlim([0 23]);
ylim([0 65]);
xlabel('V_p_v (V)', 'FontSize',15, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'b')
ylabel('P_p_v (W)', 'FontSize',15, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'b')
set(plot3(1), 'DisplayName', strcat(string(TaC(1)), ' °C'));
set(plot3(2), 'DisplayName', strcat(string(TaC(2)), ' °C'));
set(plot3(3), 'DisplayName', strcat(string(TaC(3)), ' °C'));
set(plot3(4), 'DisplayName', strcat(string(TaC(4)), ' °C'));
set(plot3(5), 'DisplayName', strcat(string(TaC(5)), ' °C'));
grid minor
legend show
legend('Location', 'northwest')
legend('NumColumns', 2)
plot3(6)=plot(str2num(vm1), str2num(m1), 'o', 'MarkerSize', 8);
plot3(7)=plot(str2num(vm2), str2num(m2), 'o', 'MarkerSize', 8);
plot3(8)=plot(str2num(vm3), str2num(m3), 'o', 'MarkerSize', 8);
plot3(9)=plot(str2num(vm4), str2num(m4), 'o', 'MarkerSize', 8);
plot3(10)=plot(str2num(vm5), str2num(m5), 'o', 'MarkerSize', 8);
set(plot3(6), 'DisplayName', strcat(num2str(str2num(m1)), ' W'));
set(plot3(7), 'DisplayName', strcat(num2str(str2num(m2)), ' W'));
set(plot3(8), 'DisplayName', strcat(num2str(str2num(m3)), ' W'));
set(plot3(9), 'DisplayName', strcat(num2str(str2num(m4)), ' W'));
set(plot3(10), 'DisplayName', strcat(num2str(str2num(m5)), ' W'));
% %magnifyOnFigure()
% %print ( strcat("pot_per_panel_", name) , '-dmeta' , '-r1366' )

```





<b>REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA</b>			
<b>FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN</b>			
<b>TEMA Y SUBTEMA:</b>	Evaluación de efectos térmicos en paneles solares aplicando las ecuaciones de Navier Stokes bajo diferentes condiciones climáticas estacionarias para la optimización en la producción de energía eléctrica		
<b>AUTOR(ES)</b>	Ana Gabriela Tigse Lara		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	Ing. Gustavo Mazzini Muñoz, Mgs, MSc. Diana Bohórquez Heras / Ing. Celso Bohórquez Escobar, PhD		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Sistema de Posgrado		
<b>CARRERA:</b>	Maestría en Electricidad con Mención en Energías Renovables y Eficiencia Energética.		
<b>TITULO OBTENIDO:</b>	Magíster en Electricidad con Mención en Energías Renovables y Eficiencia Energética.		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	23 de noviembre de 2023	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	86
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Energías Renovables, Sistema Fotovoltaico		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Análisis Por Efectos Térmicos, Paneles Fotovoltaicos, Navier Stokes, Punto De Máxima Potencia, Corriente De Máxima Potencia, Voltaje De Máxima Potencia, Dinámica De Fluidos		
<b>RESUMEN/ABSTRACT:</b>	<p>Esta investigación aborda la generación de electricidad mediante la minimización de las pérdidas asociadas al análisis térmico de los paneles fotovoltaicos. El comportamiento térmico de los paneles se expone por medias las expresiones de Navier-Stokes, y el modelo se resuelve usando el software Autodesk CFD (dinámica de fluidos computacional). Los datos de temperatura obtenidos para todo el conjunto fotovoltaico se utilizan para calcular las corrientes y voltajes de máxima potencia, lo que permite determinar la potencia eléctrica total del sistema, así como la de cada panel fotovoltaico individual.</p> <p>Se definieron tres escenarios para investigar la incidencia de temperatura e identificar los parámetros relevantes a la hora de utilizar la refrigeración por convección natural en un sistema fotovoltaico. El análisis posterior se centró en la eficiencia eléctrica de los paneles fotovoltaicos basada en la potencia obtenida y calculada. Los resultados muestran que, con un espaciamiento uniforme tanto en filas como en columnas, una temperatura inicial baja (19°C-26°C) implica una mayor eficiencia de las celdas solares y una mayor producción de potencia.</p>		
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593-997046128	<b>E-mail:</b> ana.tigse@cu.ucsg.edu.ec	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::</b>	<b>Nombre:</b> Ing. Celso Bayardo Bohórquez Escobar, PhD		
	<b>Teléfono:</b> +593-995147293		
	<b>E-mail:</b> celso.bohorquez@cu.ucsg.edu.ec		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			