



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y TECNOLOGÍAS SUSTENTABLES

Optimización de la Eficiencia Energética del Ciclo de Refrigeración de un
Sistema Fotovoltaico de Concentración Solar

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y TECNOLOGÍAS SUSTENTABLES

PRESENTA

I.M. FRANCISCO JAVIER ALVARADO REYES

ASESOR

DR. MOISÉS MONTIEL GONZÁLEZ

COASESOR

DR. IVÁN SALGADO TRÁNSITO



ENERO 2025

AGRADECIMIENTOS CONAHCYT

El presente proyecto de investigación, desarrollado como parte de la tesis del programa de posgrado de la Maestría en Ingeniería Ambiental y Tecnologías Sustentables, se llevó a cabo en las instalaciones de la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería (FCQeI) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, así como en el laboratorio de energía solar fotovoltaica del Centro de Investigaciones en Óptica, unidad Aguascalientes. El trabajo fue realizado bajo la asesoría y dirección del Dr. Moisés Montiel González y la co-asesoría del Dr. Iván Salgado Tránsito, con el apoyo del Programa de Becas Nacionales de Posgrado otorgado por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONAHCYT).

COMITÉ REVISOR

DR. MOISÉS MONTIEL GONZÁLEZ

DR. IVÁN SALGADO TRÁNSITO

DRA. MARÍA MAGDALENA MORALES GUILLÉN

DRA. MARIANA ROMERO AGUILAR

DR. ESTEBAN MONTIEL PALACIOS

AGRADECIMIENTOS

- A la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, y en especial al Dr. Moisés Montiel González, por su valiosa orientación, asesoría, tiempo y consejos.
- Al Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., y particularmente al Dr. Iván Salgado Tránsito y al Dr. Arturo Díaz Ponce, por su confianza, apoyo y asesoría durante este proceso.
- Al comité sinodal y revisor de tesis por su dedicación, atención y valiosas observaciones que enriquecieron este trabajo de investigación.
- A mis padres, mi hermano y familia por su amor incondicional, apoyo y constante motivación.
- A las nuevas amistades que surgieron a lo largo del camino, por su apoyo, consejos, motivación y momentos de alegría compartidos.
- Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), por el apoyo otorgado durante la realización de la maestría.

Índice

Índice de tablas.....	7
Índice de figuras.....	8
Resumen.....	10
<i>Abstract</i>	10
Introducción	11
Capítulo 1	12
1.1. Antecedentes	12
1.1.1. Energías renovables.....	12
1.1.2. Energía solar: el caso de México.....	13
1.1.3. Sistemas fotovoltaicos.....	15
1.1.4. Sistemas fotovoltaicos de concentración (CPV)	17
1.2. Planteamiento del problema	22
1.3. Objetivo general.....	22
1.3.1. Objetivos específicos.....	22
1.4. Justificación.....	22
1.5. Hipótesis.....	23
Capítulo 2	24
2.1 Estado del arte de los subsistemas de enfriamiento aplicados a sistemas CPV	24
2.1.1. Tipos de enfriamiento en sistemas CPV	24
2.1.1.1. Subsistemas de enfriamiento activo en sistemas CPV	25
2.1.1.2. Subsistemas de enfriamiento pasivo en sistemas CPV.....	27
2.2. Dinámica de fluidos computacional	30
2.2.1. Estructura de un modelo CFD.....	31
2.2.2. Verificación y validación	33
Capítulo 3	34
3.1 Metodología y diseño experimental	34
3.1.1. Metodología experimental.....	34
3.2. Diseño geométrico del disipador de calor	35
3.3. Variables y escenarios de evaluación	36
3.3.1. Ángulo de inclinación	37
3.3.2. Irradiancia solar directa (DNI)	37

3.3.3. Temperatura ambiente y velocidad del viento.....	38
3.3.4. Caso crítico.....	40
3.3.5. Escenarios de simulación	40
3.4. Materiales y métodos	41
3.4.1. Sistema de seguimiento solar de doble eje.....	41
3.4.2. Módulo de concentración solar	42
3.4.3. Celda CPV.....	43
3.4.4. Disipador de calor	43
3.4.5. Cámara termográfica.....	44
3.4.6. Adquisidor de datos.....	45
3.4.7. Trazador de curvas IV	45
3.4.8. Termopares	46
3.5. Campaña experimental.....	47
Capítulo 4.....	50
4.1 Simulaciones	50
4.1.1. Simulación CFD.....	50
4.1.2. Diseño óptico del sistema CPV	61
Capítulo 5.....	63
5.1 Resultados	63
5.1.1. Post procesamiento.....	63
5.1.2. Simulación térmica de la celda CPV	65
5.1.3. Análisis óptico	66
5.1.4. Mediciones experimentales	67
5.1.5. Validación.....	67
5.1.6. Desviación relativa porcentual	69
5.1.7. Análisis de regresión múltiple.....	69
5.2. Discusión	71
Capítulo 6.....	73
6.1 Conclusión y trabajo a futuro	73
Bibliografía	74

Índice de tablas

Tabla 2.1 Coeficiente de transferencia de calor por convección del aire y del agua en condiciones de convección natural y forzada.....	24
Tabla 3.1 Escenarios de simulación.....	40
Tabla 3.2 Características de la celda CPV.....	43
Tabla 3.3 Características de los termopares.	46
Tabla 3.4 Tabla de incertidumbres.	49
Tabla 4.1 Dimensiones y propiedades termo físicas de los materiales de la celda CPV.....	58
Tabla 5.1 Resultados de las simulaciones.	65
Tabla 5.2 Resultados obtenidos de la temperatura de la celda CPV durante la campaña experimental.	67
Tabla 5.3 Comparación entre resultados de simulación y datos experimentales.....	68
Tabla 5.4 Calculo de la desviación relativa porcentual.	69
Tabla 5.5 Resultados del análisis de regresión múltiple.....	70

Índice de figuras

Figura 1.2 Promedios anuales y diarios de distribución de irradiancia solar sobre la superficie de México (SOLARGIS, 2017).	13
Figura 1.3 Tendencias de capacidad instalada de energía solar térmica, del 2018 al 2021, en México (IRENA, 2022).	14
Figura 1.4 Tendencias de capacidad instalada de energía solar fotovoltaica, del 2011 al 2021, en México (IRENA, 2022).	14
Figura 1.5 Representación esquemática de un panel solar fotovoltaico (Ecosistemas del sureste, 2017).	15
Figura 1.6 Representación del efecto fotovoltaico en un panel solar (Panelpower, 2024).	16
Figura 1.7 Diagrama esquemático de una instalación eléctrica fotovoltaica (EnergíaFV, 2018).	16
Figura 1.8 Representación del funcionamiento de un sistema fotovoltaico y un sistema fotovoltaico de concentración.	17
Figura 1.9 Ejemplos de subsistemas de concentradores ópticos, clasificados en función de la estrategia para concentrar radiación solar.	18
Figura 1.10 Elementos ópticos secundarios en distintas geometrías (Fu, 2010).	18
Figura 1.11 Diagrama esquemático del funcionamiento del elemento óptico secundario.	19
Figura 1.12 Diagrama esquemático del posicionamiento de la celda solar basado en el punto de concentración de las lentes y el eje focal de los reflectantes.	20
Figura 1.13 Tipos de seguidores solares, de dos ejes, para sistemas fotovoltaicos de concentración.	20
Figura 1.14 Fotografías de la parte posterior de distintos módulos de concentración fotovoltaica con diferentes diseños en sus disipadores de calor.	21
Figura 2.1 Configuración experimental de un módulo CPV refrigerado por agua (Du et al., 2012).	25
Figura 2.2 Efecto del caudal del agua sobre la eficiencia eléctrica (Du et al., 2012).	25
Figura 2.3 (A) Celda CPV, (B) ensamble de la celda CPV, disipador de calor y (C) bifurcación de canales (Wu et al., 2021).	26
Figura 2.4 Estructura de los sistemas fotovoltaicos (Zubeer et al., 2021).	27
Figura 2.5 Disipador de a) aletas circulares y b) aletas rectas (Aldossary et al., 2016).	27
Figura 2.6 Disipadores de calor de aletas acampanadas probados con 3, 7, 11, 15 o 19 aletas con alturas de 35, 75 y 115 mm (Luo et al., 2019).	28
Figura 2.7 (a) Ensamble de la celda CPV y (b) celda CPV integrada al disipador (Zaghloul et al., 2021).	29
Figura 2.8 Diagrama esquemático de la celda CPV integrada al disipador de calor (Refaey et al., 2022).	30
Figura 2.9 Etapas para la resolución de un problema mediante CFD (Montilla et al., 2021).	31
Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología experimental.	34
Figura 3.2 Dimensiones del disipador de calor de aletas rectas.	35
Figura 3.3 Dimensiones del disipador de aletas curvas.	36
Figura 3.4 Distribución del ángulo de inclinación a lo largo de un día.	37
Figura 3.5 Relación entre el ángulo de inclinación y la DNI.	38
Figura 3.16 Termopares a) tipo J y b) aislados tipo K.	47

Figura 3.17 Diagrama esquemático del montaje del experimento.	48
Figura 4.1 a) Capas de la celda CPV, b) celda CPV acoplada a la superficie del disipador de aletas rectas y c) celda CPV acoplada a la superficie del disipador de aletas curvas.	50
Figura 4.13 Distribución de capas de una celda CPV.....	57
Figura 5.1 Vectores de velocidad del viento en a) disipador de aletas rectas y b) disipador de aletas curvas.	63
Figura 5.2 Líneas de corriente del viento en a) disipador de aletas rectas y b) disipador de aletas curvas.	64
Figura 5.3 Perfil de temperatura del caso crítico en a) disipador de aletas rectas y b) disipador de aletas curvas.	64
Figura 5.6 Relación lineal	70
Figura 5.7 Relación entre la temperatura simulada, calculada con la Ecuación 8, y la temperatura experimental.	71

Resumen

El presente trabajo aborda una de las problemáticas de los sistemas fotovoltaicos de concentración, el sobrecalentamiento en las celdas fotovoltaicas debido a la radiación solar concentrada, lo cual puede reducir la eficiencia de estos sistemas y acelerar su degradación. Para enfrentar este desafío se propone el desarrollo de un subsistema de enfriamiento eficiente, de bajo consumo energético y fácil instalación que mantenga la celda fotovoltaica por debajo de su temperatura máxima de operación. Para ello, se identificaron factores críticos que fueron integrados en un modelo de disipación de calor. Mediante simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y un análisis paramétrico de la geometría, materiales y características del fluido de operación, se establecieron condiciones óptimas de funcionamiento. Después del proceso de manufactura del disipador de calor, se llevó a cabo una etapa experimental donde se evaluó la efectividad del subsistema de enfriamiento en condiciones ambientales reales. Los resultados de esta etapa demostraron la efectividad del subsistema de enfriamiento propuesto. Además, se validó la fiabilidad del modelo de simulación CFD y se identificaron variables que afectan la disipación de calor.

Abstract

This work addresses one of the problems of concentrating photovoltaic systems, the overheating of photovoltaic cells due to concentrated solar radiation, which can reduce the efficiency of these systems and accelerate their degradation. To address this challenge, the development of an efficient, energy-efficient and easy-to-install cooling subsystem that keeps the PV cell below its maximum operating temperature is proposed. To this end, critical factors were identified and integrated into a heat dissipation model. Through Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations and a parametric analysis of the geometry, materials and characteristics of the operating fluid, optimal operating conditions were established. After the heat sink manufacturing process, an experimental stage was carried out to evaluate the effectiveness of the cooling subsystem under real environmental conditions. The results of this stage demonstrated the effectiveness of the proposed cooling subsystem. In addition, the reliability of the CFD simulation model was validated and variables affecting heat dissipation were identified.

Nomenclatura		Letras griegas	
A	Área superficial del disipador, m^2	β	Coefficiente de expansión térmica del aire, K^{-1}
A_{celda}	Área activa de la celda CPV, m^2	$\beta_{térmica}$	Coefficiente de expansión térmica de la celda CPV, K^{-1}
C_p	Calor específico, $J/kg \cdot K$	η_{celda}	Eficiencia de la celda CPV
g	Aceleración de la gravedad, m/s^2	η_{ref}	Eficiencia de referencia de la celda CPV
h	Coefficiente de transferencia de calor, $W/m^2 \cdot K$	η_{opt}	Eficiencia óptica del sistema CPV
k	Conductividad térmica, $W/m \cdot K$	μ	Viscosidad, $kg/s \cdot m$
$P_{calor,celda}$	Calor residual generado por la celda CPV, W	ρ	Densidad, kg/m^3
Q	Pérdida de calor por convección natural, W	Abreviaciones	
$\dot{q}$	Generación de calor por unidad de volumen, W/m^3	Al	Aluminio
T	Temperatura, $^{\circ}C$	Al_2O_3	Óxido de aluminio
T_{amb}	Temperatura ambiente, $^{\circ}C$	CPV	Fotovoltaico de concentración
T_{celda}	Temperatura promedio de la celda CPV, $^{\circ}C$	CR	Factor de concentración
T_{ref}	Temperatura de referencia de la celda CPV, $^{\circ}C$	Cu	Cobre
T_s	Temperatura en la superficie del disipador, $^{\circ}C$	DNI	Irradiancia solar directa
V	Volumen, m^3	Ge	Germanio
u, v, w	Componentes de velocidad, m/s		
x, y, z	Componentes de coordenadas		

Introducción

El cambio climático es una problemática a nivel mundial, así lo considera el Acuerdo de París, un tratado internacional en el que los países involucrados se comprometen a reducir sus emisiones de carbono y a colaborar para hacer frente a los desafíos ambientales.

Uno de los objetivos a largo plazo de este tratado es acelerar la transición energética mediante la generación de energías limpias y dejar a un lado las energías provenientes de fuentes no renovables. Existen varias fuentes de energías renovables como la energía eólica, la energía geotérmica, la hidroeléctrica, la oceánica, la bioenergía, entre otras. Sin embargo, la fuente que encabeza el crecimiento promedio anual es la energía solar, en específico, la energía solar fotovoltaica.

Esta energía es aprovechada mediante celdas o paneles fotovoltaicos con una eficiencia entre el 12 % y el 24%. En un esfuerzo por aumentar este porcentaje se ha trabajado con otro tipo de celdas fotovoltaicas, las celdas fotovoltaicas de concentración.

Las celdas fotovoltaicas de concentración hacen uso de una serie de lentes y espejos que concentran la radiación solar en una celda fotovoltaica de menor tamaño que las convencionales, esto, sumado a los materiales con los que se fabrica dicha celda, permite alcanzar eficiencias de más del 47% (NREL, 2024).

Sin embargo, al estar expuestas a altas concentraciones solares alcanzan grandes temperaturas que pueden afectar sus componentes y al mismo tiempo su eficiencia.

Por lo tanto, es indispensable un método de enfriamiento eficaz, confiable, de bajo consumo energético y de fácil instalación y mantenimiento que mantenga a las celdas fotovoltaicas en un rango de temperatura óptimo.

Capítulo 1

1.1. Antecedentes

1.1.1. Energías renovables

Se sabe que la producción de energía basada en la utilización de combustibles fósiles ha generado efectos negativos sobre el ambiente, como lo son; modificaciones en el suelo, contaminación de cuerpos de agua y la emisión de gases de efecto invernadero, que a su vez han provocado fenómenos como el calentamiento global, que está afectando de forma directa e indirecta las formas de vida en el planeta.

Debido a esto surgió la necesidad de explorar nuevas formas de generación de energía que tengan un menor impacto negativo en el ambiente y que su costo de producción sea menor. Estas propuestas llamadas “energías renovables” o “energías limpias” se desarrollan gracias a recursos naturales que pueden ser aprovechados de forma sustentable, como: energía hidráulica, energía eólica, energía de la biomasa, energía geotérmica y la energía solar (Figura 1.1).

En México, la cantidad de energía generada a partir de fuentes renovables aumentó entre 2020 y 2021, pasando de 26.306 MW a 29.443 MW (IRENA, 2022); teniendo, hasta 2019, 50 parques fotovoltaicos, 68 parques eólicos y 66 hidroeléctricas; lo que indica que México tiene potencial de crecimiento para la generación de energías renovables.



Figura 1.1 Distribución de la producción de energías renovables en México (China Dialogue, 2020).

1.1.2. Energía solar: el caso de México

Los flujos de energía que recibe la Tierra de las denominadas energías renovables derivan, en su mayor parte, de la energía procedente del sol, la energía solar. La energía solar es una fuente de energía renovable, no contaminante y prácticamente ilimitada.

La energía total que llega a la Tierra procedente del sol es de aproximadamente 1,559,280 TW en un año, de los cuales alrededor del 1 % podrían ser utilizables (José. A et al., 2009). Aun cuando la energía solar se distribuye por todo el planeta, es superior en zonas ecuatoriales y tropicales e inferior en las zonas polares. Además, su potencial energético es variable en función de la hora del día, época del año y situación atmosférica, nubes, niebla, smog, etc.

La manera de medir el potencial de energía solar que un territorio tiene es a través de la radiación solar. Según datos de la International Renewable Energy Agency (IRENA, 2015), México se encuentra entre 15° y 35° de latitud, región considerada la más favorecida en recursos solares, donde recibe diariamente, en promedio, 5.5 kW/m² (Figura 1.2).



Figura 1.2 Promedios anuales y diarios de distribución de irradiancia solar sobre la superficie de México (SOLARGIS, 2017).

El aprovechamiento de la energía solar puede realizarse convirtiendo la radiación electromagnética del sol en calor o directamente en electricidad.

De estas dos, según datos de la IRENA, la energía solar térmica ha mantenido sus niveles de capacidad en 14 MW durante el periodo de 2018 a 2021 (Figura 1.3).

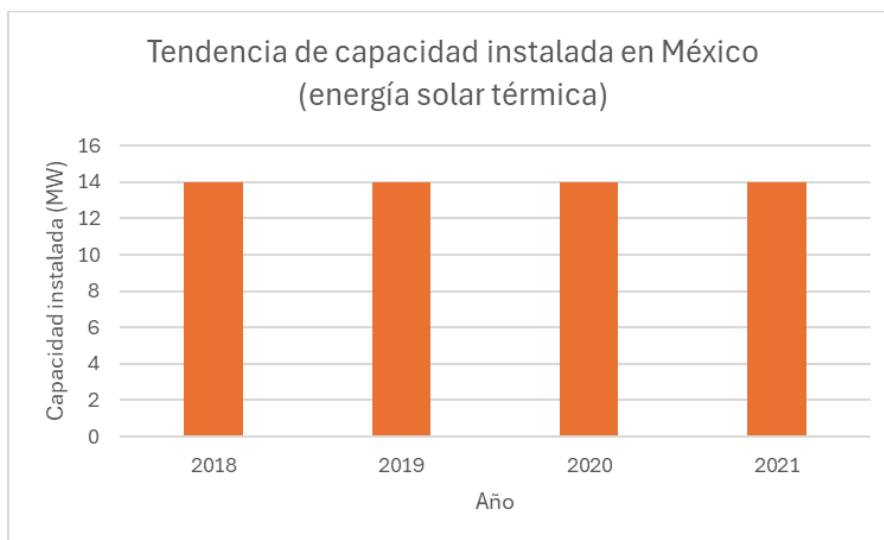


Figura 1.3 Tendencias de capacidad instalada de energía solar térmica, del 2018 al 2021, en México (IRENA, 2022).

Mientras que la energía solar fotovoltaica ha ido en aumento, no solo durante el mismo periodo, si no desde la última década (Figura 1.4).

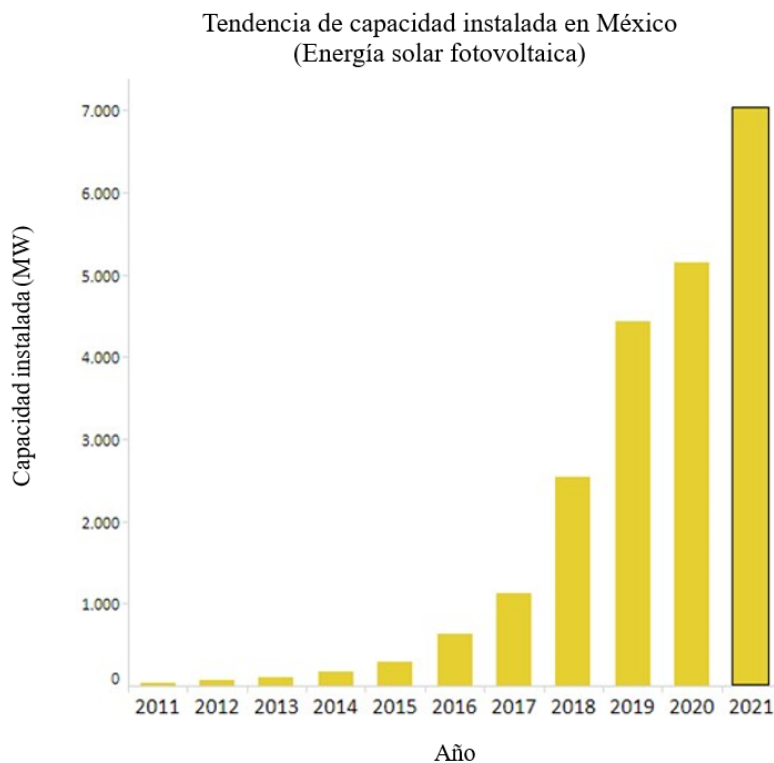


Figura 1.4 Tendencias de capacidad instalada de energía solar fotovoltaica, del 2011 al 2021, en México (IRENA, 2022).

1.1.3. Sistemas fotovoltaicos

La energía solar fotovoltaica se basa en la utilización de paneles solares o fotovoltaicos, fabricados con materiales semiconductores cristalinos que generan corriente eléctrica cuando sobre ellos incide la radiación solar. Estos paneles están integrados por un conjunto de celdas fotovoltaicas que se conectan en serie y paralelo con el propósito de lograr determinados niveles de tensión e intensidad eléctrica. Asimismo, su estructura proporciona resistencia mecánica, facilita la evacuación del calor, incrementando así su rendimiento, y favorece la optimización de la captación de la radiación solar (Figura 1.5).

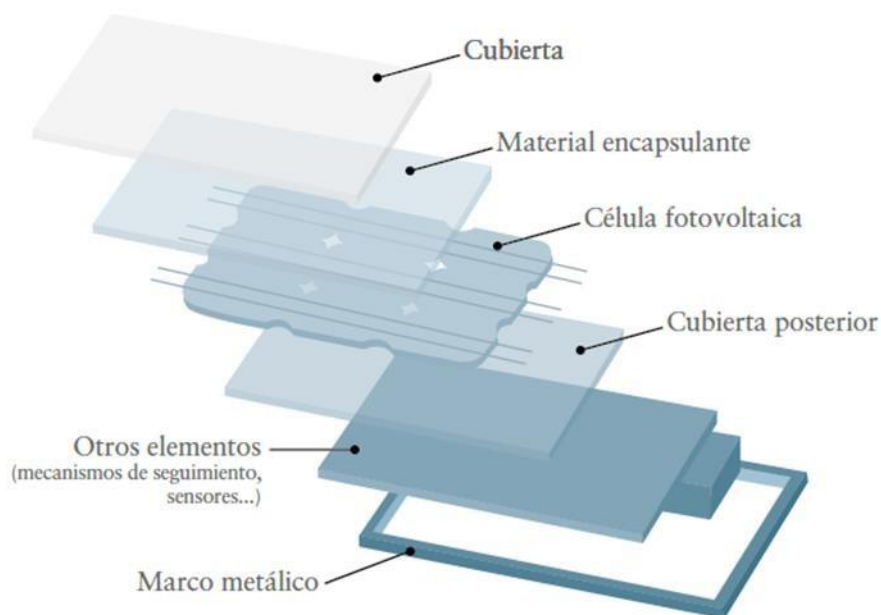


Figura 1.5 Representación esquemática de un panel solar fotovoltaico (Ecosistemas del sureste, 2017).

La forma en la que las celdas fotovoltaicas convierten la radiación solar en energía eléctrica es debido al efecto fotovoltaico (Figura 1.6). Los materiales semiconductores como el silicio, que es el material más usado para la fabricación de paneles solares, tienen la particularidad de propiciar el efecto fotovoltaico debido al comportamiento eléctrico que tienen ante el impacto con los fotones de la luz.

El efecto fotovoltaico se inicia en el momento en el que un fotón impacta con un electrón de la última órbita de un átomo de silicio (electrón de valencia), recibiendo así la energía con la que viajaba el fotón. Si la energía que adquiere el electrón supera la fuerza de atracción del núcleo del átomo de silicio, este sale de su órbita y queda libre. Al quedar libre, el electrón deja atrás un hueco que ocupará un electrón que haya sido liberado de otro átomo. Estos movimientos de electrones producen corriente eléctrica.

Esta corriente puede salir del material con el fin de realizar un trabajo, para que esto suceda es necesaria la presencia de un campo eléctrico de polaridad constante. El campo polariza las partículas y actúa como bomba que impulsa los electrones. En los paneles solares

convencionales, el campo eléctrico se forma gracias a que una zona del material tiene exceso de electrones (carga negativa), mientras que la otra tiene carencia de ellos (carga positiva).

De este modo, al liberar un electrón, que tiene carga negativa, este es impulsado a través del material hasta la zona donde la carga es positiva.

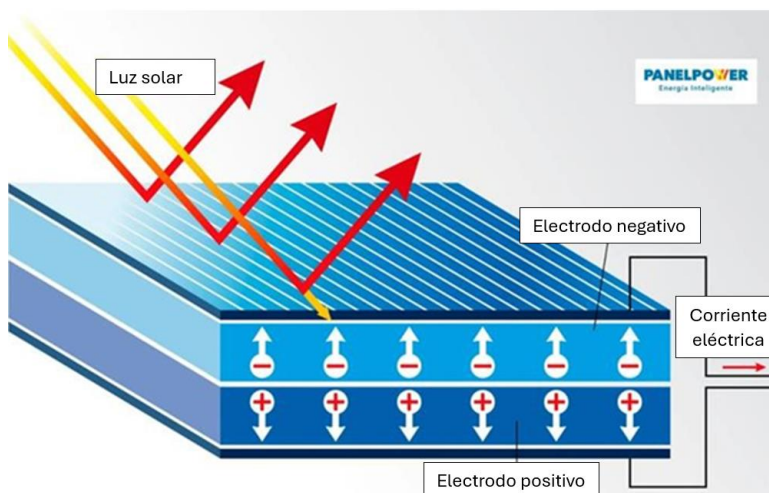


Figura 1.6 Representación del efecto fotovoltaico en un panel solar (Panelpower, 2024).

Para aplicar este tipo de sistemas es necesario incluir un sistema de almacenamiento energético o de acumulación, en los sistemas fotovoltaicos la energía producida por las celdas se almacena en baterías. En otras aplicaciones la energía se acumula en la propia red eléctrica.

De forma general un sistema fotovoltaico está conformado por los siguientes subsistemas: subsistema de captación, subsistema de almacenamiento, subsistema de regulación y subsistema convertidor de corriente (Figura 1.7).

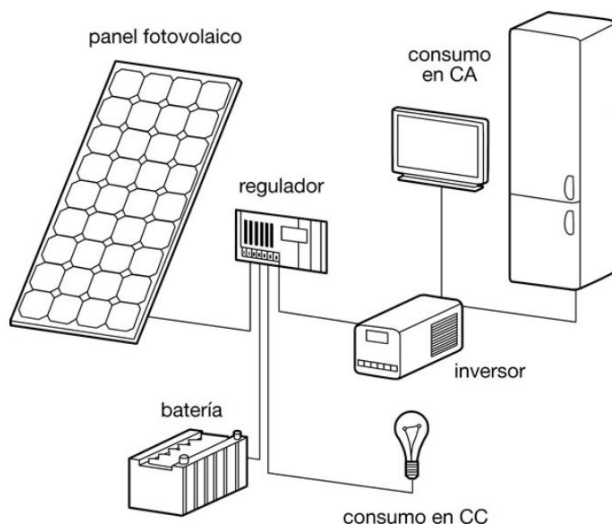


Figura 1.7 Diagrama esquemático de una instalación eléctrica fotovoltaica (EnergíaFV, 2018).

Los sistemas fotovoltaicos pueden ser usados en un amplio rango de aplicaciones, entre las que se encuentran sistemas de pequeña escala en el sector residencial, sistemas de mediana escala en el sector comercial, sistemas de gran escala en el sector de las compañías de electricidad y aplicaciones aisladas de distintas capacidades.

La energía solar fotovoltaica es un área tecnológica que ha crecido en los últimos años, pero que sigue en desarrollo para mejorar su eficiencia y disminuir sus costos.

1.1.4. Sistemas fotovoltaicos de concentración (CPV)

Los sistemas fotovoltaicos de concentración (CPV por sus siglas en inglés) son una variante de los sistemas de energía solar fotovoltaica. El propósito de estos sistemas es aumentar la eficiencia y reducir los costos que la cantidad de material semiconductor en un sistema fotovoltaico produce. A cambio, se propone utilizar elementos ópticos, de bajo costo, como lo son lentes Fresnel y/o espejos de alta reflectividad para concentrar la radiación solar en celdas solares de alta eficiencia. (Figura 1.8).

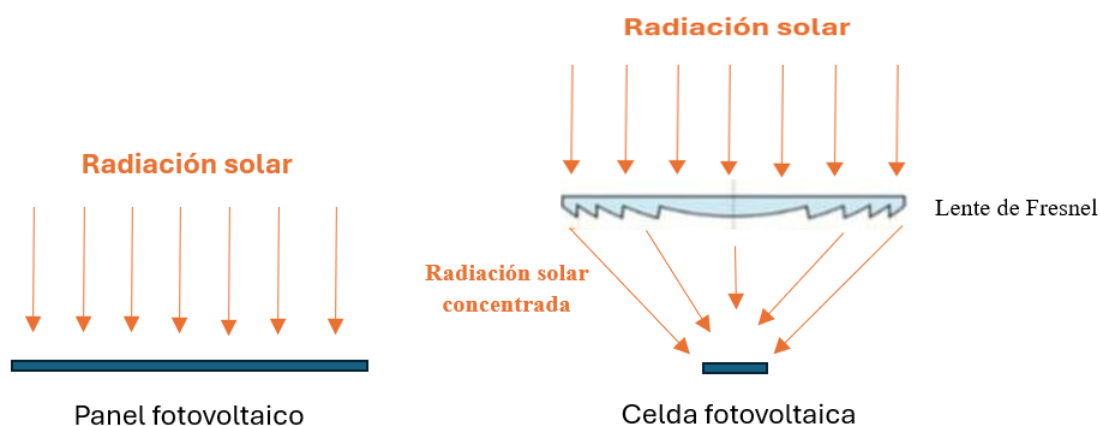


Figura 1.8 Representación del funcionamiento de un sistema fotovoltaico y un sistema fotovoltaico de concentración.

Usualmente estos sistemas se clasifican de acuerdo con su factor de concentración, es decir, el número de veces que la radiación solar es concentrada, como baja (< 10 soles), media (10-100 soles), alta (100- 2000 soles) y ultra alta (> 2000 soles). Donde 1 sol = $1,000 \text{ W/m}^2$.

Un sistema CPV se compone de varios subsistemas:

1.1.4.1. Elemento óptico primario

Espejos concéntricos o lentes cuyo objetivo es alcanzar un alto flujo de irradiancia sobre una zona focal. Se clasifican en función de la estrategia utilizada para concentrar la radiación solar. Son refractivos cuando se usan lentes, o reflectivos cuando se usan espejos. Además, si la radiación solar es concentrada en un punto al sistema se le llama de enfoque puntual y

si la radiación solar es concentrada en una línea se le llama sistema de enfoque lineal (Figura 1.9).

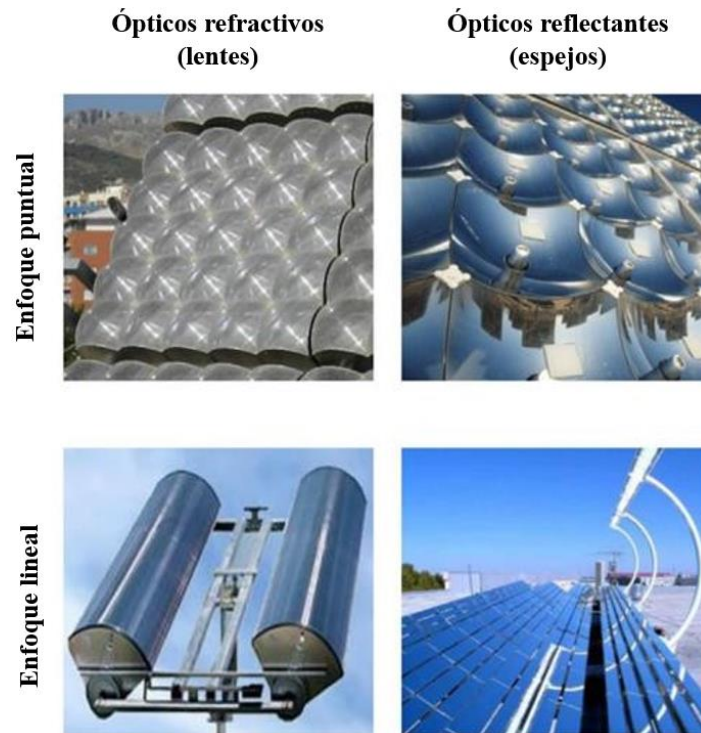


Figura 1.9 Ejemplos de subsistemas de concentradores ópticos, clasificados en función de la estrategia para concentrar radiación solar.

1.1.4.2. Elemento óptico secundario

Los sistemas CPV de enfoque puntual suelen integrar elementos ópticos secundarios que optimizan su rendimiento haciendo uso de estructuras ópticas especulares o refractantes de diversas formas (Figura 1.10).

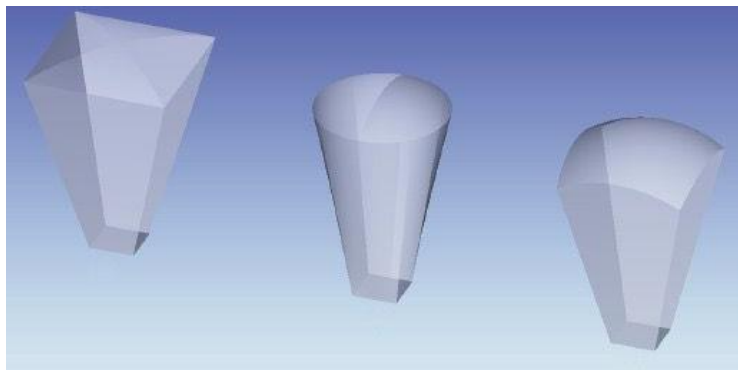


Figura 1.10 Elementos ópticos secundarios en distintas geometrías (Fu, 2010).

Estos elementos se diseñan y adaptan en función de las características del elemento óptico primario, requisitos de rendimiento y tamaño de la celda CPV (Chen & Chiang, 2015). Sus

funciones son; proporcionar una concentración adicional, incrementar el ángulo de aceptación del sistema y mejorar la uniformidad de la irradiancia que llega a la celda CPV (Figura 1.11). (Fu, et al., 2010)

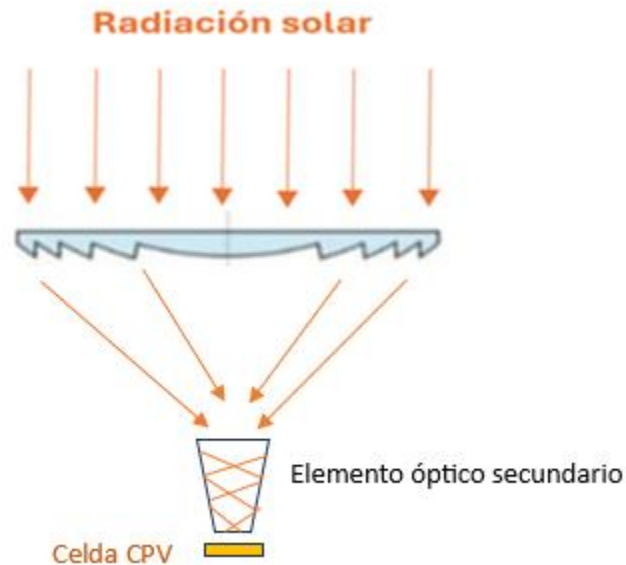


Figura 1.11 Diagrama esquemático del funcionamiento del elemento óptico secundario.

1.1.4.3. Celda solar

Las celdas solares utilizadas en los sistemas de concentración fotovoltaica son diferentes de las celdas utilizadas en los paneles fotovoltaicos tradicionales. Estas deben soportar una densidad de radiación mucho mayor. Son celdas de multi-unión, es decir, están compuestas por diferentes capas (por ejemplo, GaInP/GaInAs/Ge) para aprovechar un rango más amplio del espectro solar, de este modo se consigue una eficiencia mucho más alta, llegando hasta el 47.1 % de eficacia en condiciones controladas en laboratorios. La celda se sitúa en el eje focal de los espejos o en el punto de concentración de las lentes (Figura 1.12).

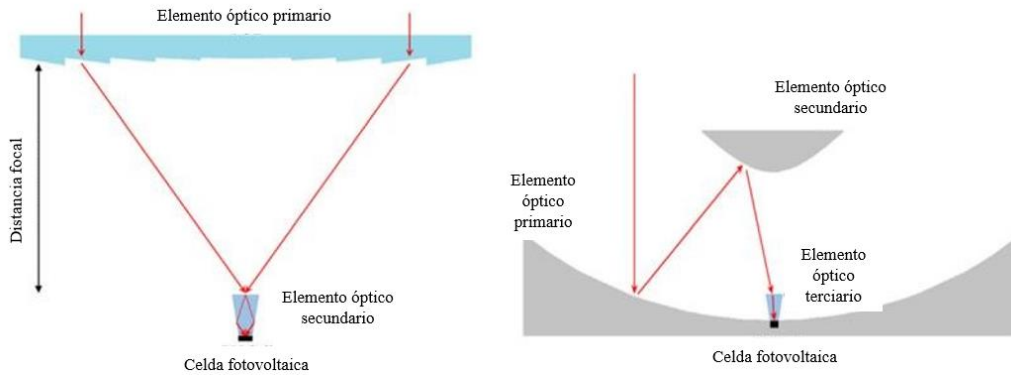


Figura 1.12 Diagrama esquemático del posicionamiento de la celda solar basado en el punto de concentración de las lentes y el eje focal de los reflectantes.

1.1.4.4. Seguimiento solar

Los elementos ópticos deben tener una alineación respecto al sol, es decir seguir al sol durante el día para que la superficie óptica (lente o espejo) esté siempre perpendicular a la radiación solar. Sin este seguimiento, el sistema CPV no puede producir electricidad, ya que la luz no se concentra en la celda. Debido a esto, los módulos son montados en una estructura mecánica móvil con dos ejes de movimiento, uno para seguir al sol en su desplazamiento de este a oeste y otro para hacerlo en altura. Sin embargo, existen sistemas de seguimiento que cuentan con un sólo eje vertical (Figura 1.13).

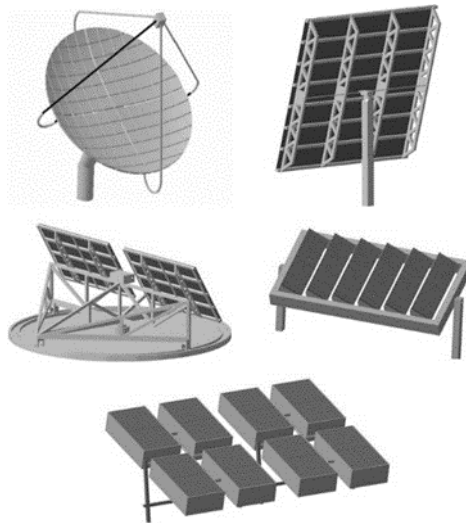


Figura 1.13 Tipos de seguidores solares, de dos ejes, para sistemas fotovoltaicos de concentración.

1.1.4.5. Subsistema de enfriamiento

A pesar del uso de celdas solares de alta eficiencia, la mayor parte de la energía solar se convierte en calor. Esto conduce a un aumento de temperatura en la celda que podría afectar negativamente su rendimiento. Por lo tanto, los sistemas CPV suelen estar acoplados a un

mecanismo de enfriamiento para mantener la temperatura de operación de la celda dentro de los límites para evitar dañarla.

Hay muchas posibilidades para implementar mecanismos de enfriamiento, tanto pasivos como activos. Un óptimo sistema de enfriamiento debe ser simple para asegurar una alta confiabilidad y no aumentar significativamente el costo total del sistema.

Aunque nuevas tecnologías y materiales están siendo investigados para este propósito, se ha demostrado que los sistemas de enfriamiento pasivo manejan con éxito la gestión térmica para altas concentraciones, siendo usado un disipador de calor de placa de metal, generalmente de aluminio, como la solución más común para estos sistemas gracias a la gran superficie disponible para efectuar la transferencia de calor. También, disipadores de calor de aluminio con aletas han demostrado ser adecuados para distribuir el calor residual (Figura 1.14).

Estas opciones ofrecen un amplio campo para el diseño y optimización de los sistemas CPV.



Figura 1.14 Fotografías de la parte posterior de distintos módulos de concentración fotovoltaica con diferentes diseños en sus disipadores de calor.

1.1.4.6. Inversores

Este es un dispositivo común a todos los sistemas fotovoltaicos y es el encargado de transformar la corriente continua producida en los módulos fotovoltaicos, en corriente alterna para su transporte o distribución.

1.2. Planteamiento del problema

Las celdas solares fotovoltaicas de concentración, al estar expuestas a radiación solar concentrada, tienden a calentarse y a sobrepasar su temperatura máxima de operación lo que puede causar pérdidas de eficiencia en el sistema y ocasionar su eventual degradación.

En este proyecto, se pretende diseñar un subsistema de enfriamiento eficiente, de bajo consumo energético y fácil instalación que permita el adecuado funcionamiento y mantenga dentro del rango de temperatura de operación a las celdas fotovoltaicas.

1.3. Objetivo general

Contribuir al desarrollo de sistemas fotovoltaicos de concentración mediante el diseño y evaluación de un subsistema de enfriamiento.

1.3.1. Objetivos específicos

Comparar y analizar sistemas fotovoltaicos de concentración existentes en la literatura científica para identificar características clave de los subsistemas de enfriamiento.

Diseñar un prototipo, integrando los factores identificados para evaluar la eficiencia del subsistema de enfriamiento.

Emplear simulaciones mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para llevar a cabo un estudio paramétrico de la geometría, características del fluido de refrigeración y materiales, con el fin de establecer condiciones que mantengan las celdas CPV por debajo de su temperatura máxima de operación.

Manufacturar un prototipo, utilizando materiales de bajo costo, para llevar a cabo pruebas experimentales en condiciones ambientales reales.

Evaluar la efectividad del subsistema de enfriamiento propuesto y proponer mejoras que impulsen el proyecto.

1.4. Justificación

Este proyecto, para optimizar la eficiencia de los sistemas CPV, no solo responde a la necesidad de abordar el cambio climático, sino que también busca contribuir con la Agenda 2030 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. El diseño y aplicación de un subsistema de enfriamiento eficiente no solo motiva el uso de fuentes de energía renovable, contribuyendo al ODS 7 (Energía Asequible y No Contaminante), sino que también impulsa la innovación en tecnologías limpias (ODS 9) y promueve una transición hacia una economía más verde y sostenible (ODS 12).

Además, desde la perspectiva de la economía circular, se busca prolongar la vida útil de las celdas CPV, reduciendo la necesidad de nuevos materiales en su producción y minimizando la generación de residuos.

1.5. Hipótesis

Teórica: El diseño de un subsistema de enfriamiento eficiente para sistemas fotovoltaicos de concentración, logrará una reducción en la temperatura de operación de las celdas CPV.

Experimental: La implementación del subsistema de enfriamiento en condiciones reales de operación mostrará una disminución en la temperatura de operación de las celdas CPV comprobando la efectividad del subsistema de enfriamiento propuesto.

Capítulo 2

2.1 Estado del arte de los subsistemas de enfriamiento aplicados a sistemas CPV

Durante los últimos años, los sistemas fotovoltaicos de concentración se han visto como una prometedora fuente de energía renovable por sus altos niveles de eficiencia en la conversión de luz solar en electricidad. Sin embargo, al ser una tecnología relativamente nueva aún se ve limitada por algunas cuestiones, entre ellas la temperatura de operación de las celdas CPV. Los altos niveles de radiación solar generan un considerable calor que afecta el funcionamiento de estos componentes por lo que el control de su temperatura de operación es fundamental para mantener la eficiencia de estos sistemas.

En este capítulo se recopila diversos trabajos de investigación y desarrollo de subsistemas de enfriamiento aplicados a sistemas fotovoltaicos de concentración, analizan diferentes técnicas de estudio y se propone la implementación de nuevos sistemas que contribuyan a la expansión y optimización de la energía solar como fuente renovable.

2.1.1. Tipos de enfriamiento en sistemas CPV

Las tecnologías de enfriamiento en los sistemas CPV se pueden dividir en dos tipos: enfriamiento activo y enfriamiento pasivo. Los subsistemas de enfriamiento activo requieren aplicar una fuente de energía externa para reducir la temperatura de un sistema mientras que los subsistemas de enfriamiento pasivo aprovechan fenómenos naturales o diseños pensados para mantener las temperaturas en un rango óptimo. Para los subsistemas de enfriamiento tradicionales, los medios de trabajo suelen ser agua o aire. La Tabla 2.1 compara el coeficiente de transferencia de calor por convección del aire y el agua en condiciones naturales y forzadas.

Tabla 2.1 Coeficiente de transferencia de calor por convección del aire y del agua en condiciones de convección natural y forzada.

Condición	Medio de trabajo	Coeficiente convectivo de transferencia de calor (W/m ² K)
Convección natural	Agua	1-10
	Aire	200-1000
Convección forzada	Agua	20-100
	Aire	1000-15000

Podría resultar obvio que los subsistemas de enfriamiento activo tienen un mejor rendimiento en cuanto a transferencia de calor y que el mejor medio de trabajo es el agua. Sin embargo, el uso de un subsistema u otro dependerá de distintos factores y objetos de estudio. Costos

de inversión, mantenimiento, consumo eléctrico, peso o el factor de concentración solar de un sistema CPV son características que determinan el subsistema de enfriamiento requerido.

2.1.1.1. Subsistemas de enfriamiento activo en sistemas CPV

Du y colaboradores (Du et al., 2012) utilizaron una tubería de aluminio por la cual hicieron fluir agua para enfriar una celda solar montada en un sistema CPV de enfoque lineal (Figura 2.1).



Figura 2.1 Configuración experimental de un módulo CPV refrigerado por agua (Du et al., 2012).

Con un factor de concentración de 8.5 soles, concluyeron que, con un mayor caudal de agua, se extrae más calor de la celda solar y, por lo tanto, la temperatura de la celda disminuye y la eficiencia eléctrica de la celda aumenta (Figura 2.2).

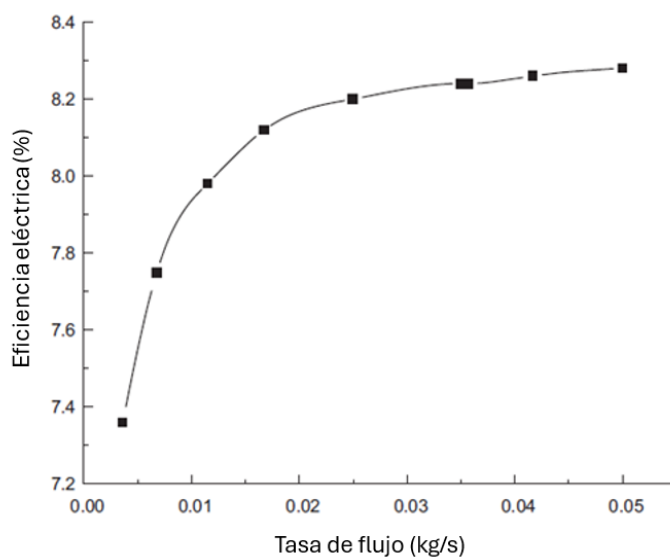


Figura 2.2 Efecto del caudal del agua sobre la eficiencia eléctrica (Du et al., 2012).

Wu y colaboradores (Wu et al., 2021) evaluaron los efectos del caudal y temperatura del agua, estación del año y factor de concentración en el rendimiento eléctrico y térmico de celdas CPV en condiciones internas (248 soles) y externas (500 y 900 soles). El experimento consistió en hacer circular agua a través de disipadores de calor con micro canales para enfriar una celda CPV acoplada a su superficie (Figura 2.3).

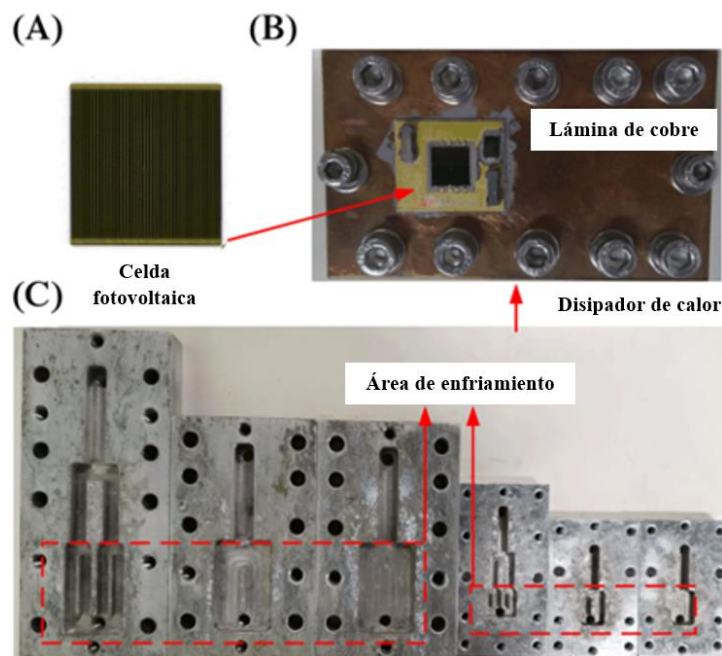


Figura 2.3 (A) Celda CPV, (B) ensamble de la celda CPV, disipador de calor y (C) bifurcación de canales (Wu et al., 2021).

Entre sus resultados, reportaron temperaturas promedio en la celda CPV de 63.2 °C a 500 soles de concentración y de 71.4 °C a 900 soles de concentración.

Zubeer y colaboradores (Zubeer et al., 2021) estudiaron el impacto de la concentración de luz solar y del subsistema de enfriamiento en el rendimiento energético de un módulo fotovoltaico. El experimento se llevó a cabo en la universidad de Duhok, Irak. Se trabajó con tres módulos idénticos de los cuales uno se ocupó como referencia, a otro se le colocó un subsistema de concentración solar y al tercero, además del subsistema de concentración solar, se le agregó un subsistema de enfriamiento activo haciendo uso de agua como flujo de trabajo (Figura 2.4). De los resultados experimentales de este estudio concluyeron que el sistema CPV enfriado con agua produjo notablemente más energía que los otros dos sistemas. Además, el subsistema de enfriamiento tuvo un efecto significativo en la reducción de la temperatura del módulo fotovoltaico.

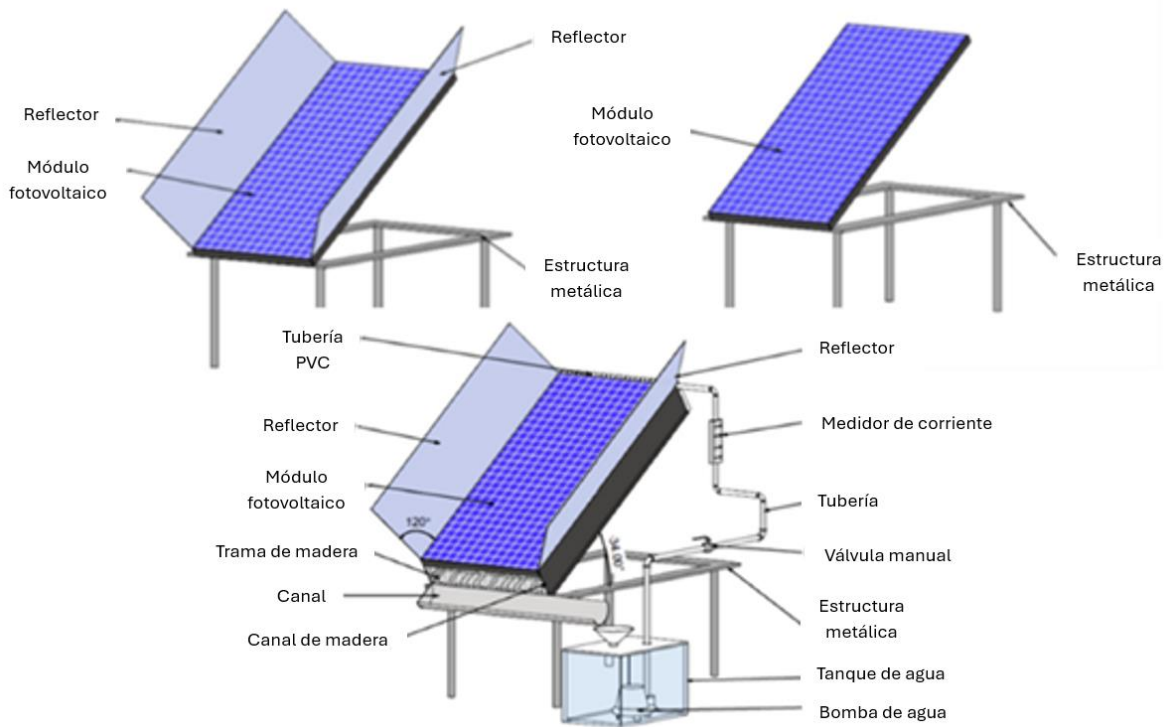


Figura 2.4 Estructura de los sistemas fotovoltaicos (Zubeer et al., 2021).

2.1.1.2. Subsistemas de enfriamiento pasivo en sistemas CPV

Aldossary y colaboradores (Aldossary et al., 2016) investigaron la viabilidad de dos subsistemas pasivos al evaluar la temperatura de operación de una celda CPV en condiciones extremas donde la temperatura ambiente puede alcanzar los 50 °C. Un factor de concentración de 500 soles y dos geometrías de disipadores distintas fueron evaluados numérica y experimentalmente (Figura 2.5).

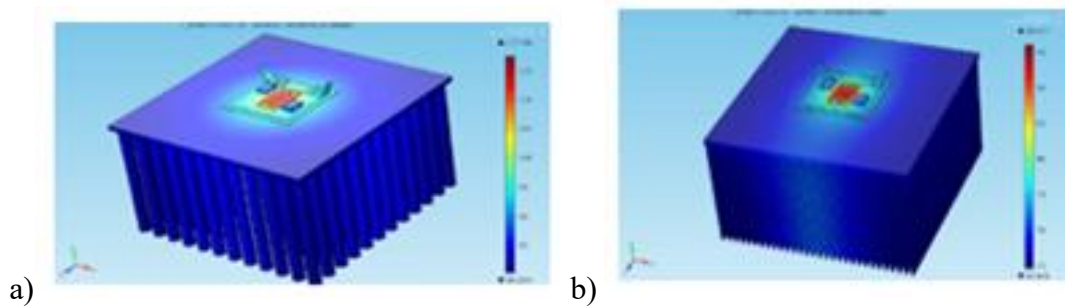


Figura 2.5 Disipador de a) aletas circulares y b) aletas rectas (Aldossary et al., 2016).

Como resultado obtuvieron temperaturas en la celda CPV de 117 °C y 96 °C para el disipador de aletas circulares y el disipador de aletas rectas, respectivamente.

Luo y colaboradores (Luo et al., 2019) propusieron en su investigación el uso de un disipador de calor de geometría acampanada para evaluar la disipación de calor de una celda CPV.

Evaluaron experimentalmente 15 muestras de disipadores en las cuales variaron la longitud y el número de aletas, así como su inclinación (Figura 2.6).

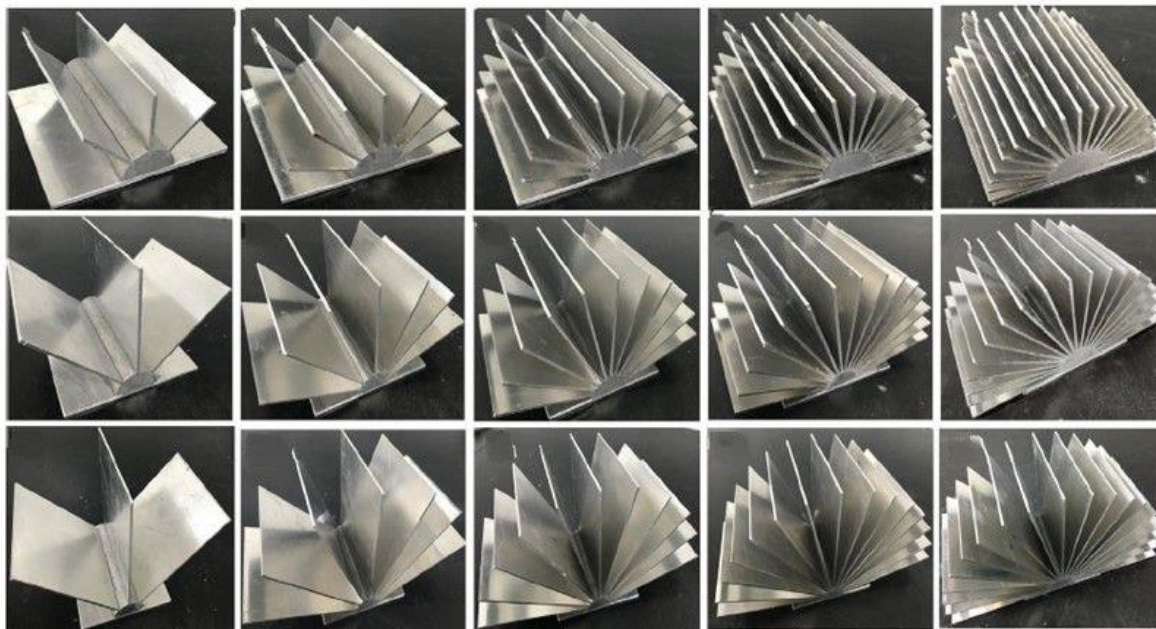


Figura 2.6 Disipadores de calor de aletas acampanadas probados con 3, 7, 11, 15 o 19 aletas con alturas de 35, 75 y 115 mm (Luo et al., 2019).

Se observó que el rendimiento térmico se ve principalmente afectado por el número de aletas y su longitud. Caso contrario, el ángulo de inclinación no representa un efecto significativo. Además, se encontró que el número óptimo de aletas para la máxima transferencia de calor fue de 15 a 18.

El estudio de Zaghoul y colaboradores (Zaghoul et al., 2021) se centró en el enfriamiento pasivo de una celda CPV mediante el uso de un disipador de calor de aletas rectas. Desarrollaron un modelo de transferencia de calor en 3D integrando las capas que componen a la celda CPV y el disipador. Además, estudiaron los efectos de la temperatura ambiente, la velocidad del viento y el factor de concentración solar en el disipador (Figura 2.7).

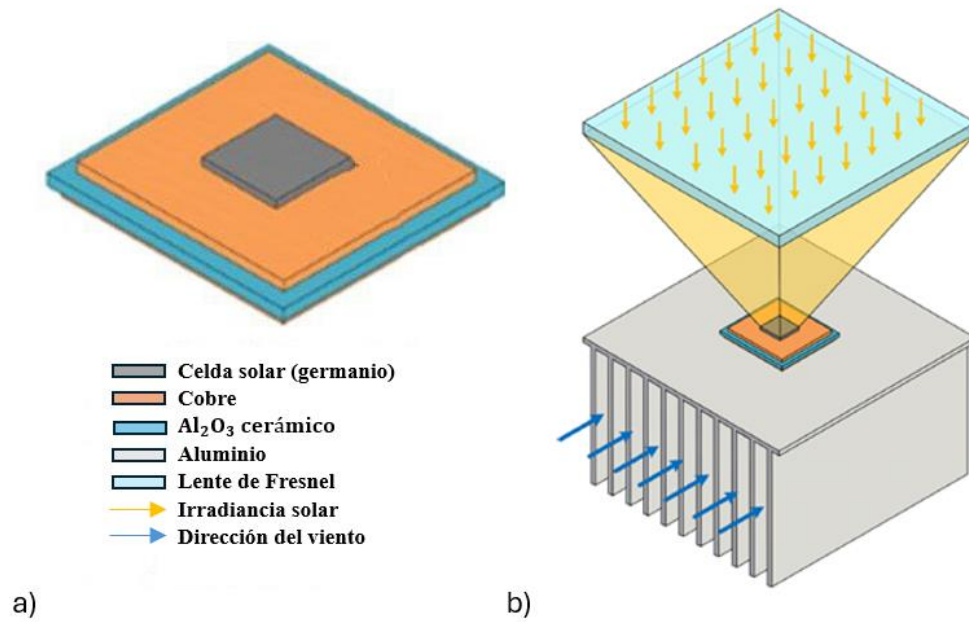


Figura 2.7 (a) Ensamble de la celda CPV y (b) celda CPV integrada al disipador (Zaghloul et al., 2021).

Los autores reportaron que, en condiciones climáticas de 45 °C de temperatura ambiente, 1 m/s de velocidad del viento y un factor de concentración solar de 500 soles, el disipador redujo la temperatura de la celda en aproximadamente 421.2 °C con referencia a la celda sin disipador de calor. Además, su análisis mostró que el factor de concentración solar tiene el efecto más significativo en el rendimiento del sistema, seguido de la temperatura ambiente y luego la longitud de las aletas.

Refaey y colaboradores (Refaey et al., 2022) realizaron un estudio experimental en condiciones climáticas de Arabia Saudita evaluó el rendimiento térmico y eléctrico de celdas CPV alimentadas a través de lentes Fresnel con factores de concentración solar entre 30.5 y 109 soles. Las características de la celda CPV se investigaron utilizando enfriamiento pasivo con dos disipadores de calor de aletas rectas con dimensiones de 40 x 40 mm y 40 x 100 mm (Figura 2.8).

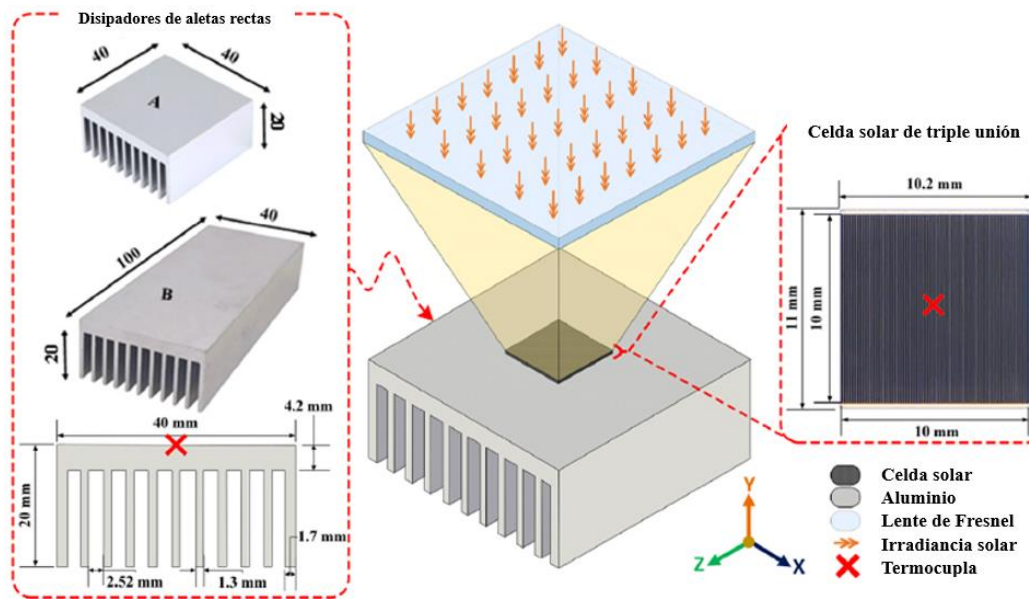


Figura 2.8 Diagrama esquemático de la celda CPV integrada al dissipador de calor (Refaey et al., 2022).

Los resultados mostraron que el disipador de calor más grande funcionó mejor ya que mantiene la temperatura de la celda CPV en 44.7, 46.8 y 52.5 °C para factores de concentración solar de 68, 80 y 109 soles, respectivamente, en comparación con 46.5, 55.4, y 66.4 °C para el disipador más pequeño en las mismas condiciones de funcionamiento.

Este compendio destaca una mayor cantidad de casos de estudio que utilizan el método de enfriamiento pasivo en comparación con el enfriamiento activo. Esto puede deberse a su costo reducido en manufactura y mantenimiento mínimo en caso de ser aplicado a mayor escala. En estos trabajos se han propuesto variadas condiciones y niveles de concentración solar. A pesar de esta disparidad, es fundamental evaluar diferentes geometrías, ya que cada configuración podría presentar ventajas específicas en términos de distribución de flujo de calor, eficiencia térmica y adaptabilidad a distintas condiciones ambientales. El análisis del estado del arte proporciona un panorama general de las técnicas y consideraciones exploradas por distintos autores que son esenciales para comprender y optimizar la eficacia del enfriamiento en sistemas fotovoltaicos de concentración.

2.2. Dinámica de fluidos computacional

El estudio de un fenómeno físico se puede dividir, generalmente, en dos métodos: teórico y experimental. Las ventajas y desventajas de cada uno de estos dependerán de la naturaleza del problema y de las condiciones que este requiera. La experimentación, que puede realizarse en pequeña o gran escala, muchas veces requiere de un alto costo económico y de inversión de tiempo para obtener resultados, mismos que únicamente serán aplicables en las condiciones en las que se llevó a cabo el experimento y que están sujetos a la incertidumbre de los instrumentos de medición. Por otro lado, el método teórico no estudia el fenómeno real, si no una idealización de este representado en un modelo matemático que permite

obtener resultados de aplicación más general y en un periodo de tiempo corto. Dicho esto, ambos métodos deben ser complementarios y el éxito de la solución muchas veces depende del uso balanceado de estos métodos.

El análisis teórico mediante dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es una herramienta útil dentro de la rama de mecánica de fluidos y consiste en la utilización de computadoras para resolver numéricamente las ecuaciones de movimiento de fluido y de transferencia de calor que en muchas ocasiones no tienen una solución analítica.

2.2.1. Estructura de un modelo CFD

La estructura general para la resolución de un problema mediante CFD se describe en la Figura 2.9, en ella se indican las etapas que conforman este tipo de análisis: modelo matemático del fenómeno de interés, discretización del modelo matemático y del dominio espacial, métodos numéricos descritos en un código de simulación y post-procesado de los resultados.

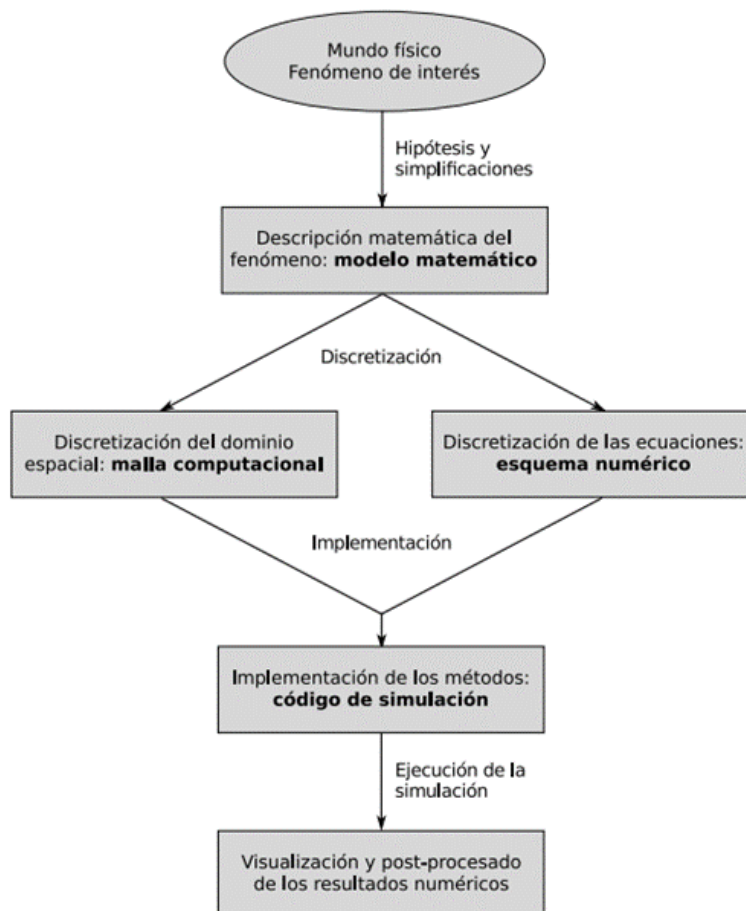


Figura 2.9 Etapas para la resolución de un problema mediante CFD (Montilla et al., 2021).

Establecer el modelo físico del fenómeno de interés

Un modelo físico es la representación gráfica que se hace del fenómeno de interés, se utiliza para plantear un problema de forma simplificada y con el propósito de estudiar su comportamiento bajo ciertas circunstancias.

Descripción matemática del fenómeno de interés

Para describir lo que ocurre físicamente en el fenómeno se establece una ecuación o un conjunto de ecuaciones definido como modelo matemático. En este punto se establecen condiciones de frontera y su condición inicial. También se requiere especificar las propiedades físicas del medio en cuestión.

Discretización del dominio espacial: malla computacional

Una malla computacional o numérica es el conjunto de nodos distribuido sobre el dominio de estudio o modelo físico, que se utiliza para la solución numérica de un grupo de ecuaciones diferenciales parciales.

Discretización de las ecuaciones: esquema numérico

El concepto de discretización numérica se define como la sustitución de la ecuación diferencial o ecuaciones diferenciales que describen el fenómeno de estudio, por un conjunto de expresiones algebraicas usando técnicas numéricas como el Método de diferencias finitas, el Método de volúmenes finitos o el Método de elementos finitos.

Código de simulación y ejecución de la simulación

En este punto los desarrolladores de software implementan métodos de solución para los sistemas de ecuaciones resultantes del proceso de discretización. La programación de este código se realiza en un compilador y el tiempo de ejecución dependerá del modelo bajo estudio. Tratándose de problemas complejos, puede tomar semanas o meses de programación y el tiempo computacional para la obtención de resultados pueden ser días o semanas.

Visualización y post procesado de los resultados numéricos

En la etapa de visualización se aglomeran el conjunto de datos de resultados en gráficos. Esta etapa es de vital importancia para el análisis de resultados ya que ayudará a un mejor entendimiento del fenómeno y permitirá llegar a conclusiones exitosas.

Errores e incertidumbre

Los resultados de una simulación mediante CFD nunca son fiables del todo, esto puede ser debido a que los datos de entrada pueden incluir imprecisiones e incertidumbre, a que el modelo matemático escogido para describir el problema sea inadecuado, a que las soluciones numéricas sufran anomalías inherentes a los métodos de discretización de las ecuaciones o incluso la precisión de los datos puede estar condicionada a la potencia de cálculo disponible.

Así en la modelación numérica mediante el uso de CFD se definen los conceptos de error e incertidumbre (Versterg et al., 2008).

Error: es la deficiencia reconocible en un modelo CFD que no es causada por la carencia del conocimiento. Las causas o fuentes de error que caen bajo esta definición son:

- a) Errores numéricos: errores de redondeo, de discretización y de criterio de convergencia.
- b) Errores de código fuente: errores en el software.
- c) Errores de usuario: errores humanos mediante uso incorrecto del software.

Incertidumbre: es deficiencia potencial en un modelo CFD que es causada por la carencia de conocimiento. Las causas o fuentes de incertidumbre son:

- a) Incertidumbre debido a información requerida: limitada representación de la geometría, aproximación en condiciones de frontera, propiedades de materiales o del medio fluido, etc.
- b) Incertidumbre debido al modelo matemático: diferencias entre el flujo real y el modelo de CFD.

2.2.2. Verificación y validación

Dos conceptos asociados a los errores e incertidumbre en CFD son la verificación y la validación. La verificación es el proceso de determinar si un modelo ha sido resuelto correctamente, este proceso debe incluir una etapa de comparación entre los resultados obtenidos contra resultados de CFD disponibles o de referencia. La validación es el proceso de determinar el grado de exactitud de un modelo para representar la realidad física y requiere la comparación de los resultados numéricos contra resultados experimentales de alta calidad.

Capítulo 3

3.1 Metodología y diseño experimental

Esta sección se enfoca en el diseño de un subsistema de enfriamiento para sistemas fotovoltaicos de concentración, así como en la determinación de parámetros de operación basados en datos climatológicos. Asimismo, se establece una estrategia para llevar a cabo una campaña experimental en el Centro de Investigaciones en Óptica, en el estado de Aguascalientes, que posibilite la evaluación de resultados en condiciones reales de operación. Detalles sobre materiales, infraestructura e instrumentos de medición también son descritos en esta sección.

3.1.1. Metodología experimental

La Figura 3.1 muestra un diagrama de flujo que describe el proceso de diseño y evaluación del proyecto.

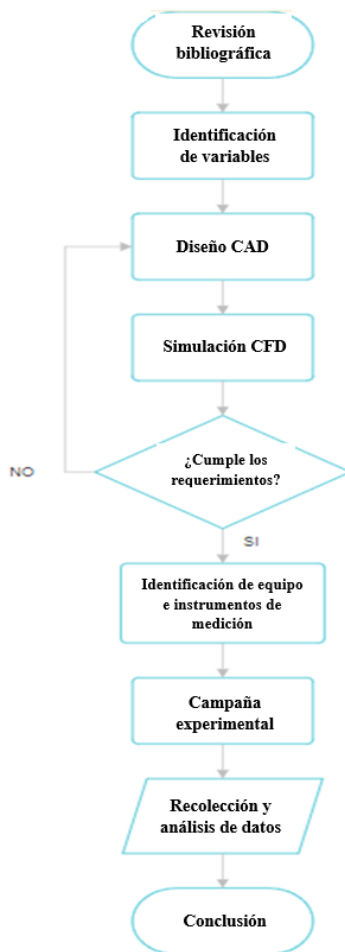


Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología experimental.

3.2. Diseño geométrico del disipador de calor

Los disipadores de calor se han usado ampliamente en los sistemas CPV. Su finalidad, mantener un nivel óptimo de temperatura en la celda CPV. Para lograrlo se han implementado distintas configuraciones geométricas, algunas de estas mencionadas en el Capítulo 2. Las propuestas de este proyecto son dos disipadores de calor de aluminio, de geometría circular y con 20 aletas, rectas y curvas, adyacentes a un medio cilindro. Las dimensiones, expresadas en milímetros se pueden observar en la Figura 3.2 para el disipador de aletas rectas y en la Figura 3.3 para el disipador de aletas curvas.

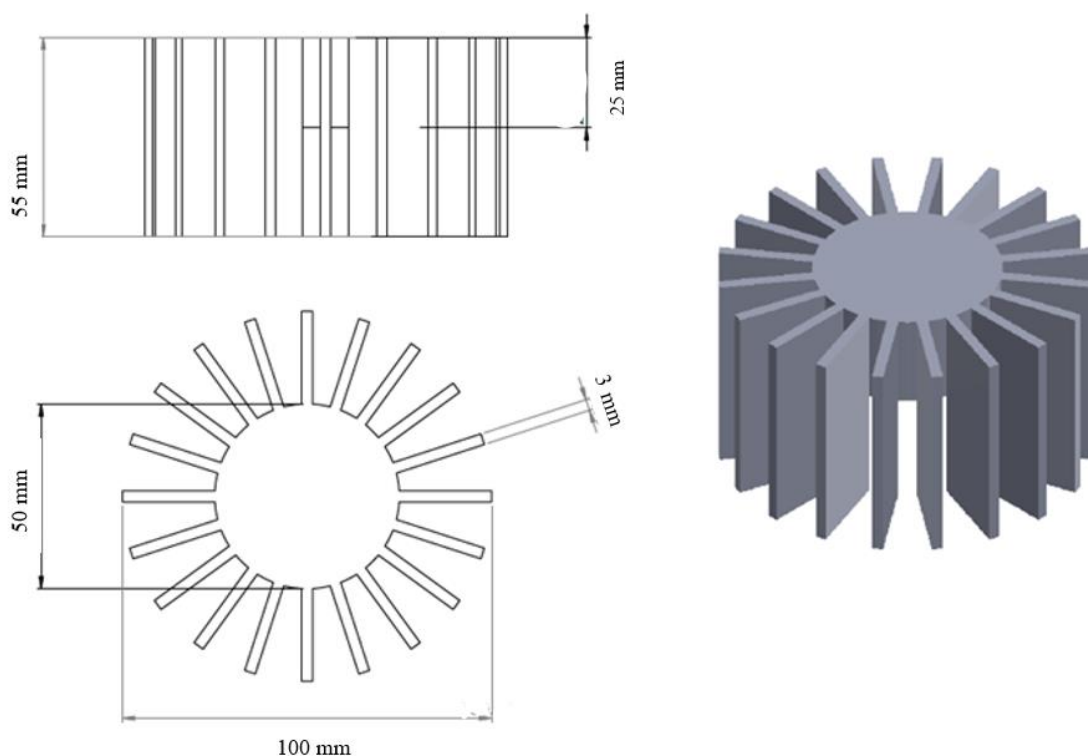


Figura 3.2 Dimensiones del disipador de calor de aletas rectas.

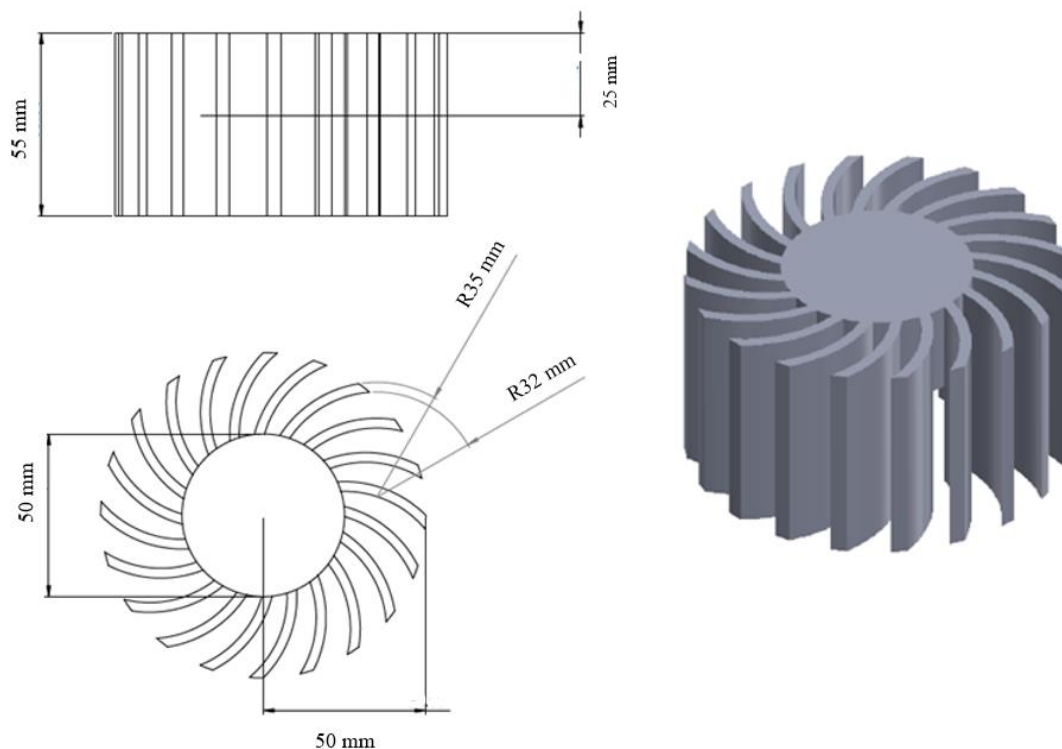


Figura 3.3 Dimensiones del disipador de aletas curvas.

3.3. Variables y escenarios de evaluación

Los parámetros especificarán las propiedades físicas en los límites del dominio de la simulación. Estas condiciones ayudan a representar situaciones del mundo real en el modelo. Estas variables pueden incluir velocidad del viento, presión atmosférica, irradiancia solar, entre otras. Para establecer estos valores es necesario saber cómo se comportará el modelo en la realidad. La parte experimental de este proyecto se llevará a cabo en el estado de Aguascalientes durante los meses de septiembre, octubre y noviembre del año 2023. Irradiancia solar directa, velocidad del viento, temperatura ambiente y el ángulo de inclinación a la que operará la celda CPV son variables dependientes de la estación del año y ubicación geográfica.

Con el objetivo de realizar una aproximación adecuada de las variables de operación, se utilizaron valores obtenidos de la base de datos correspondiente a un año típico en Aguascalientes, proporcionados por el software System Advisor Modeler (SAM, por sus siglas en inglés). SAM es un software de uso libre desarrollado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos que se utiliza para analizar, modelar y facilitar la toma de decisiones en relación con proyectos de energía renovable y eficiencia energética.

3.3.1. Ángulo de inclinación

Una característica de los sistemas CPV es que operan con irradiancia solar directa por lo que deben estar orientados perpendicularmente al sol. Este ángulo de inclinación varía dependiendo de la estación del año y la ubicación geográfica. Tomando como referencia un día del mes en el que se realizará la campaña experimental se puede estimar el ángulo de inclinación en cada momento del día. Con esta información, se seleccionaron tres ángulos que representarán, de manera general, el movimiento de un sistema CPV en un horario de 9:00 a 16:00 hrs (Figura 3.4).

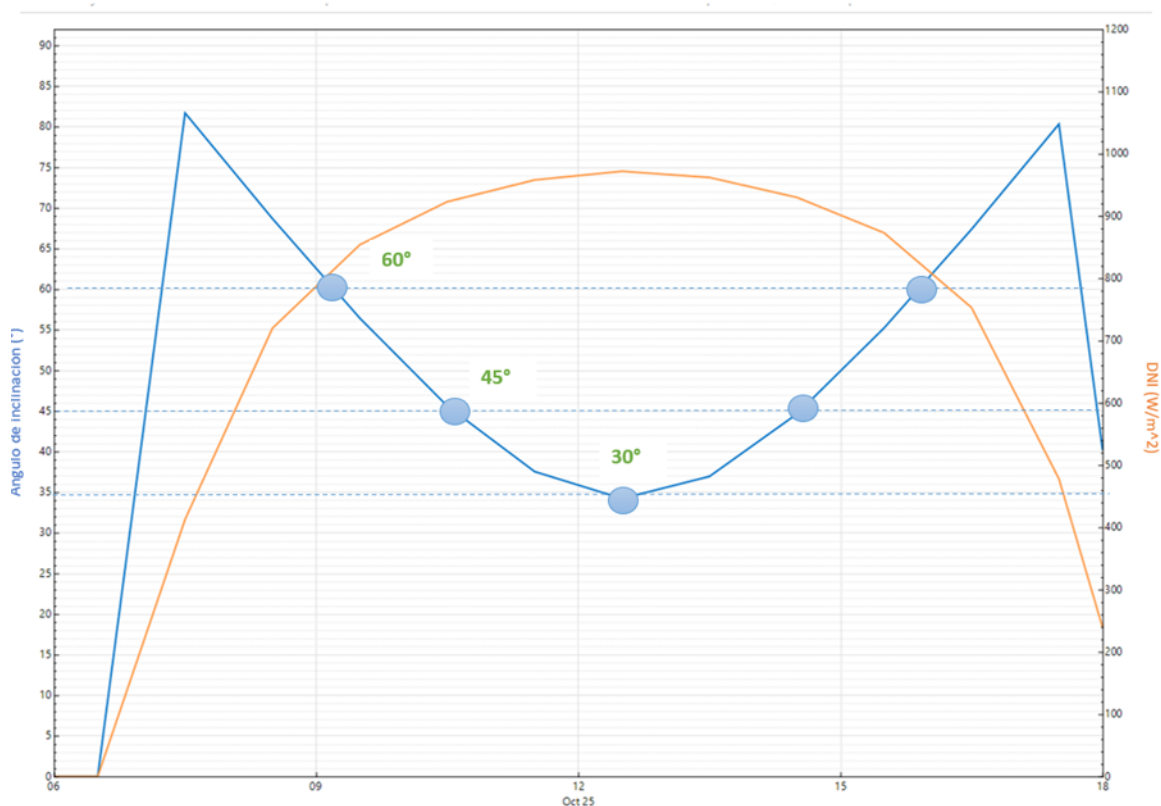


Figura 3.4 Distribución del ángulo de inclinación a lo largo de un día.

3.3.2. Irradiancia solar directa (DNI)

La irradiancia solar directa, al igual que el ángulo de inclinación, varía a lo largo del día. Para calcular los posibles valores de la DNI se tomaron como referencia los ángulos de inclinación (Figura 3.5).

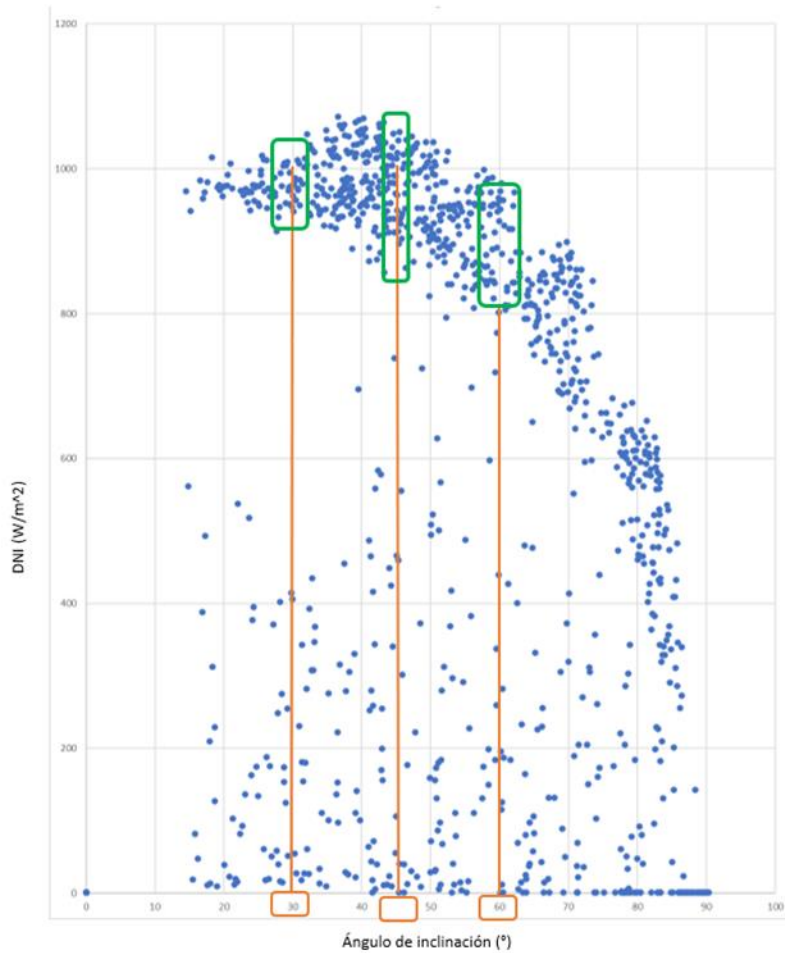


Figura 3.5 Relación entre el ángulo de inclinación y la DNI.

El análisis de esta relación se llevó a cabo utilizando el software SAM. Gracias a este, se determinó el posible valor de DNI para cada inclinación, que de manera general varía desde los 800 hasta los 1,100 W/m^2 .

3.3.3. Temperatura ambiente y velocidad del viento

Del mismo modo, los parámetros de la temperatura ambiente (Figura 3.6) y velocidad del viento (Figura 3.7) fueron estimados de acuerdo con los registros del año típico de Aguascalientes. Para la temperatura ambiente se sugirió un escenario de simulación de 20 °C y otro a 25 °C, generalizando los valores más frecuentes en el año.

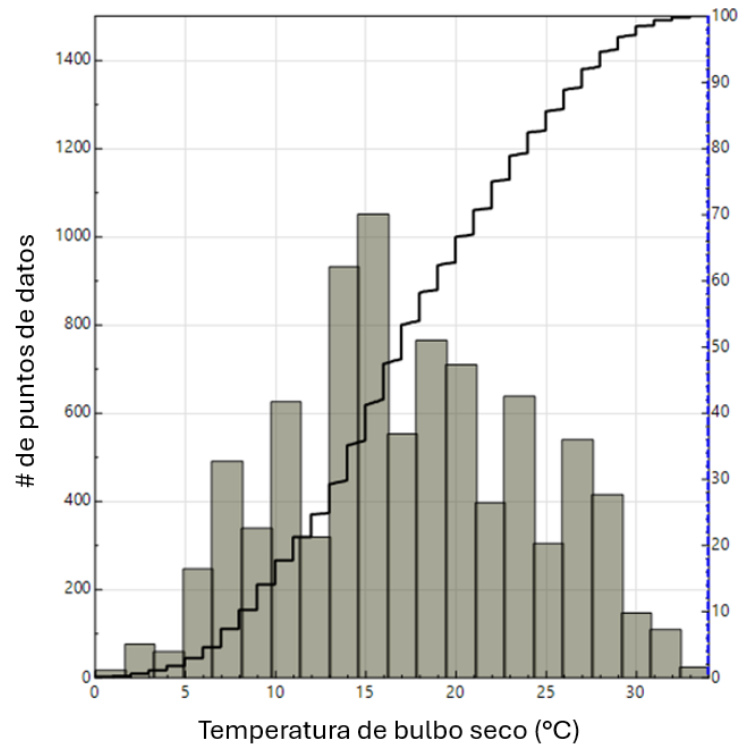


Figura 3.6 Temperatura ambiente típica en Aguascalientes.

La velocidad del viento se estableció con el valor promedio y el más frecuente durante los meses en los cuales se llevará a cabo la parte experimental que son 1.9 m/s y 1.2 m/s, respectivamente.

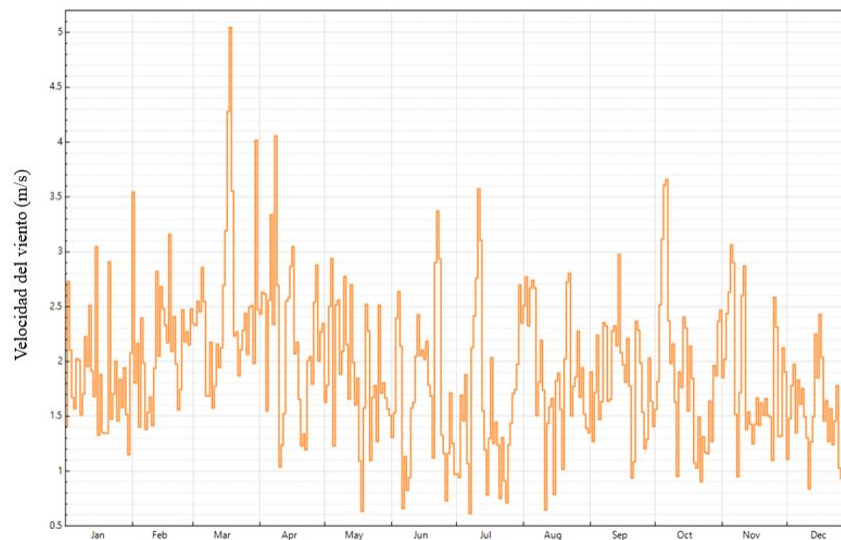


Figura 3.7 Velocidad del viento típica en Aguascalientes.

3.3.4. Caso crítico

Un escenario importante por tomar en cuenta es aquel donde coincidan aquellos parámetros que lleven a la celda CPV a operar en condiciones donde pueda alcanzar una temperatura por encima de lo usual. Este escenario permite evaluar cómo afectaría este caso crítico al rendimiento de la celda, dando la oportunidad de realizar los ajustes correspondientes para garantizar su funcionamiento. Para este caso los parámetros simulados fueron una temperatura ambiente de 30 ° C, una inclinación de 45°, un valor de DNI de 1,100 W/m² y una velocidad del viento de 0 m/s.

3.3.5. Escenarios de simulación

En resumen, los escenarios a simular se muestran en la Tabla 3.1. Haciendo un total de 43 simulaciones.

Tabla 3.1 Escenarios de simulación

Temperatura ambiente 20 °C				
Ángulo de inclinación (°)	DNI (W/m ²)	Velocidad del viento (m/s)		
		0	1.2 (promedio)	1.9 (más frecuente)
30	1000			
	900			
45	1100			
	1000			
	900			
60	900			
	800			

Temperatura ambiente 25 °C				
Ángulo de inclinación (°)	DNI (W/m ²)	Velocidad del viento (m/s)		
		0	1.2 (promedio)	1.9 (más frecuente)
30	1000			
	900			
45	1100			
	1000			
	900			
60	900			
	800			

Caso crítico	
Ángulo de inclinación (°)	45
DNI (W/m ²)	1100
Velocidad del viento (m/s)	0
Temperatura ambiente (°C)	30
Temperatura de la celda (°C)	

3.4. Materiales y métodos

3.4.1. Sistema de seguimiento solar de doble eje

Las celdas solares de concentración basan su funcionamiento en la captación de la irradiancia solar directa, a diferencia de las celdas solares convencionales que pueden aprovechar la luz difusa en el cielo. Para maximizar su rendimiento, estas celdas requieren de un sistema de seguimiento solar de dos ejes. Este sistema permite que las celdas se orienten de manera precisa hacia el sol a medida que se desplaza durante el día y, en consecuencia, lograr tasas de conversión de energía más altas.

Para la etapa experimental de este proyecto se hizo uso de un seguidor solar desarrollado e instalado en el Centro de Investigaciones en Óptica en el estado de Aguascalientes. El seguimiento solar se logra mediante un soporte montado en un poste que transfiere la carga estructural al suelo y un actuador capaz de moverse en los ejes azimutal y cenital, proporcionando una precisión de seguimiento solar de 0.3 grados, lo que resulta esencial para su uso en aplicaciones de concentración fotovoltaica (Figura 3.8 a). Para determinar la posición aparente del sol, el seguidor solar emplea un sensor microelectromecánico (MEMS) de modelo ISSA60. Este sensor se caracteriza por su bajo consumo de energía, una precisión de 0.06 grados, una clasificación de protección IP65 y un campo de visión de ± 60 grados (Figura 3.8 b).

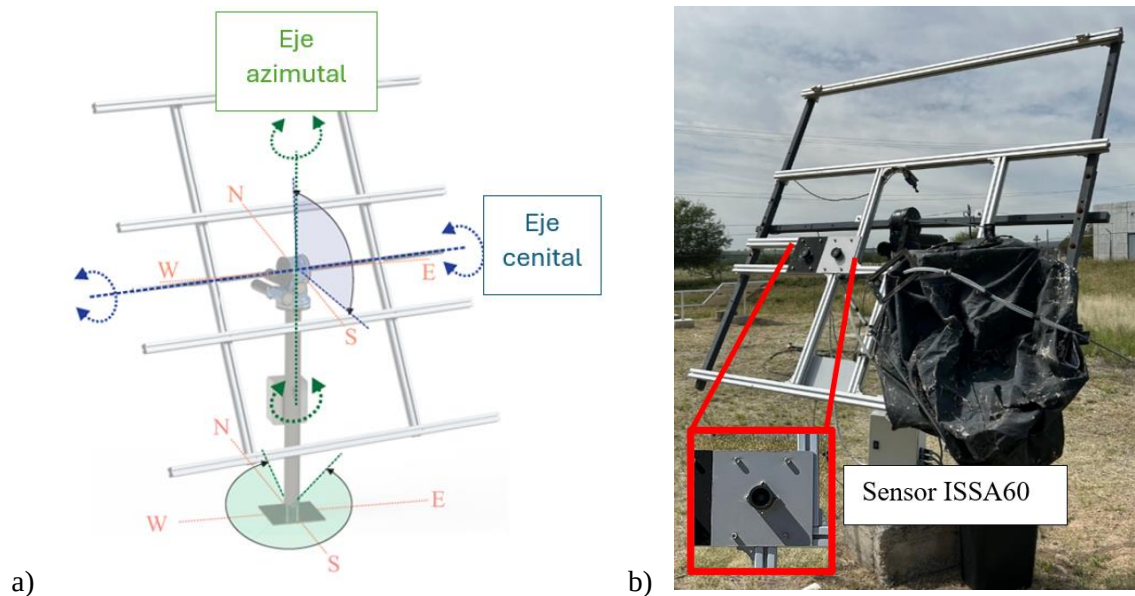


Figura 3.8 a) Ejes de rotación del seguidor solar (Angulo-Calderón et al., 2022) b) vista frontal del seguidor solar.

El sistema completo incluye un sistema de control y seguimiento en tiempo real, con componentes clave que comprenden un Arduino Mega 2560 como unidad central de control,

dos puentes H para activar los actuadores, dos interruptores termomagnéticos, un módulo de relé de 5 V con cuatro canales, dos fuentes de alimentación de 5 y 24 VCC, entre otros componentes. Además, el panel de control dispone de una interfaz que facilita tanto la supervisión como la selección de los modos de funcionamiento del sistema (Figura 3.9).

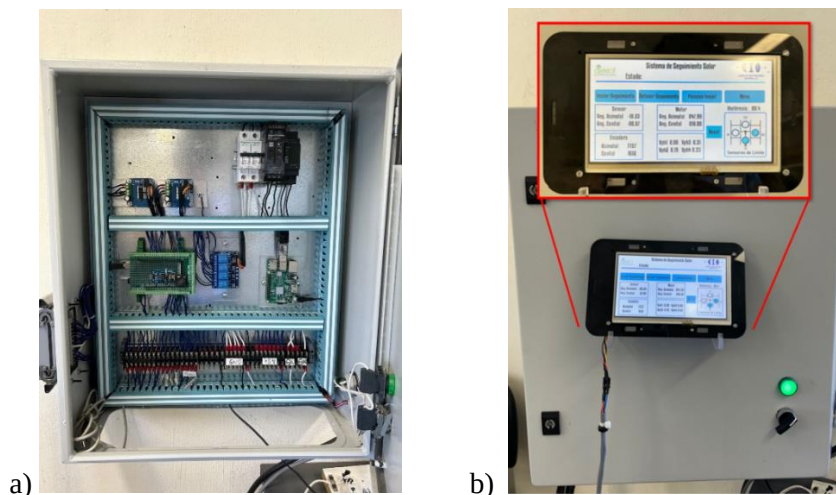


Figura 3.9 Sistema de control del seguidor solar: a) elementos del panel de control y b) interfaz del panel de control.

3.4.2. Módulo de concentración solar

Se utilizó una estructura metálica específicamente diseñada para acomodar un lente Fresnel de 30 x 30 cm con el propósito de concentrar la radiación solar de manera eficiente sobre la celda fotovoltaica. La estructura, además, permite ser montada sobre el seguidor solar permitiendo una alineación con la posición del sol a lo largo del día (Figura 3.10). De esta forma se logra maximizar la captación de energía solar y su posterior conversión en electricidad.

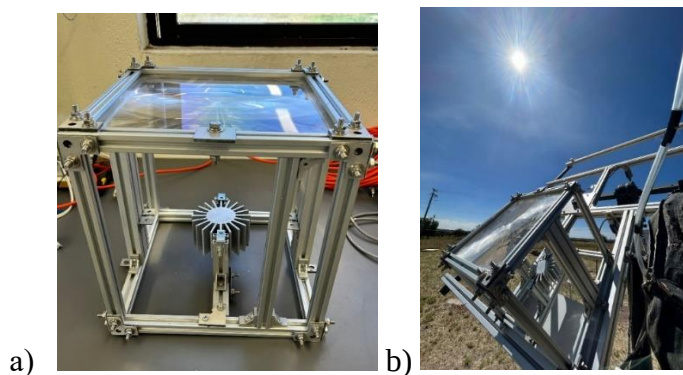


Figura 3.10 a) Módulo de concentración solar y b) montaje del módulo de concentración en el seguidor solar.

3.4.3. Celda CPV

Una celda de concentración fotovoltaica (CPV) o también conocida como celda solar multi unión está construida de múltiples capas de distintos materiales semiconductores apilados. Cada capa absorbe una porción específica del espectro de la luz solar, es decir, que se captura una gama más amplia de longitudes de onda de luz solar (Figura 3.11 a). De esta forma, aumenta significativamente su eficiencia.

La celda que se empleó para este experimento es de la marca Emcore (Figura 3.11 b). Las dimensiones y características de la celda se describen en la Tabla 3.2.

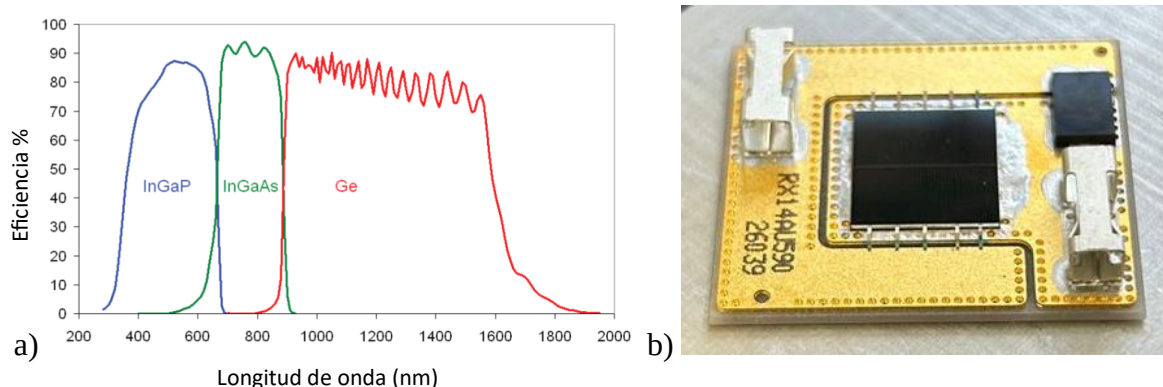


Figura 3.11 a) Materiales absorbentes y b) celda CPV.

Tabla 3.2 Características de la celda CPV.

Eficiencia típica	37%, 25 °C, 100 W/cm ²
Área activa	1.012 cm ²
Temperatura de operación	-40 °C a 100 °C
Temperatura máxima	180 °C
Factor de concentración máx	1,000 x

3.4.4. Disipador de calor

La producción de la geometría propuesta en la sección 3.2 se realizó en un taller de maquinado, donde se emplearon herramientas como el torno y la fresadora (Figura 3.12). Este proceso tuvo como principal finalidad asegurar que el elemento disipador de calor cumpliera con las dimensiones y los requisitos necesarios para su funcionamiento.

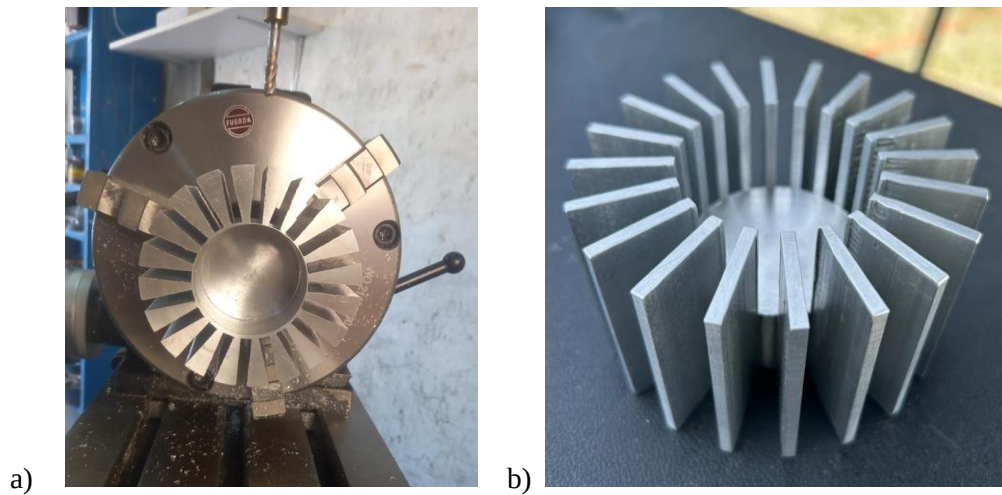


Figura 3.12 a) Proceso de manufactura del disipador de calor y b) disipador de calor terminado.

3.4.5. Cámara termográfica

Una cámara termográfica o cámara térmica es un dispositivo capaz de medir la temperatura y ofrecer una imagen térmica de los objetos, sin necesidad de contacto físico, a partir de las emisiones de radiación infrarroja que estos emiten. Cuanto más elevada sea la temperatura de un objeto, mayor será su radiación infrarroja. Las cámaras térmicas registran la temperatura en cada píxel de una imagen y la representan mediante tonos de color. Generalmente las zonas más frías se muestran en tonos azul, morado o verde, mientras que las zonas más calientes se representan en tonos rojos, naranjas o amarillos.

Para determinar la temperatura de la celda y del disipador de calor se utilizará una cámara térmica marca Optris modelo PI (Figura 3.13).



Figura 3.13 Cámara termográfica.

3.4.6. Adquisidor de datos

Un adquisidor de datos o un datalogger es un dispositivo electrónico que recopila, registra y almacena datos de forma automática y periódica a lo largo del tiempo para su posterior análisis y visualización (Figura 3.14). Con este dispositivo será posible monitorear las condiciones ambientales, la temperatura de operación de la celda fotovoltaica y la temperatura del disipador de calor a lo largo de los días en los cuales se realicen los experimentos, con una precisión de 0.04%. Esta precisión ignora el ruido del sensor o de la medición.



Figura 3.14 Datalogger Campbell Scientific CR300.

3.4.7. Trazador de curvas IV

El kit de análisis fotovoltaico es un dispositivo que mide curvas IV (corriente versus voltaje) y PV (potencia versus voltaje) que proporcionan información sobre el rendimiento de arreglos fotovoltaicos o, en este caso, las celdas fotovoltaicas de concentración. Esto es posible gracias a que captura datos de irradiancia solar con una precisión de $\pm 2\%$, de temperatura y los grados de inclinación del módulo o panel fotovoltaico. Estos últimos son medidos con un radiómetro que se sujeta al seguidor solar para estar orientado al sol de forma automática (Figura 3.15).



Figura 3.15 Kit de análisis fotovoltaico Solmetric.

3.4.8. Termopares

Un termopar es un sensor para medir temperatura. Consiste en dos metales distintos unidos por un extremo. Cuando la unión de los dos metales se calienta o enfría se produce un voltaje que se correlaciona con la temperatura. Existen diferentes tipos de termopares dependiendo su combinación de metales o calibraciones. Las calibraciones más comunes son J, K, T y E. Sus características como rango de temperatura y límites de error se describen en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Características de los termopares.

Termopares		
Calibración	Rango de temperatura (°C)	Incertidumbre (%)
J	0 a 750	0.75
K	-200 a 1250	0.75
E	-200 a 900	0.5
T	-250 a 350	0.75

Para el caso de la medición de la temperatura ambiente y la temperatura de la celda CPV se utilizarán termopares tipo J (Figura 3.16 a) y para monitorear la temperatura en la superficie del disipador de calor se utilizarán termopares aislados de tipo K (Figura 3.16 b).

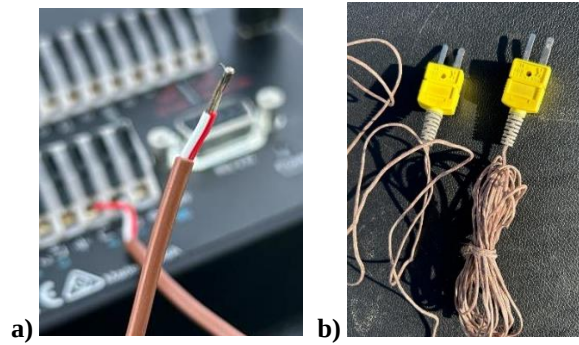


Figura 3.16 Termopares a) tipo J y b) aislados tipo K.

3.5. Campaña experimental

El experimento se llevó a cabo en las instalaciones del Centro de Investigación en Óptica en el estado de Aguascalientes. Como se mencionó en la introducción del capítulo 3, las pruebas se llevaron a cabo durante los meses de octubre y noviembre del año 2023 durante 7 días no consecutivos, en un horario de 10:00 a.m. a 4:00 p.m. Un diagrama del montaje del experimento se ilustra en la Figura 3.17.

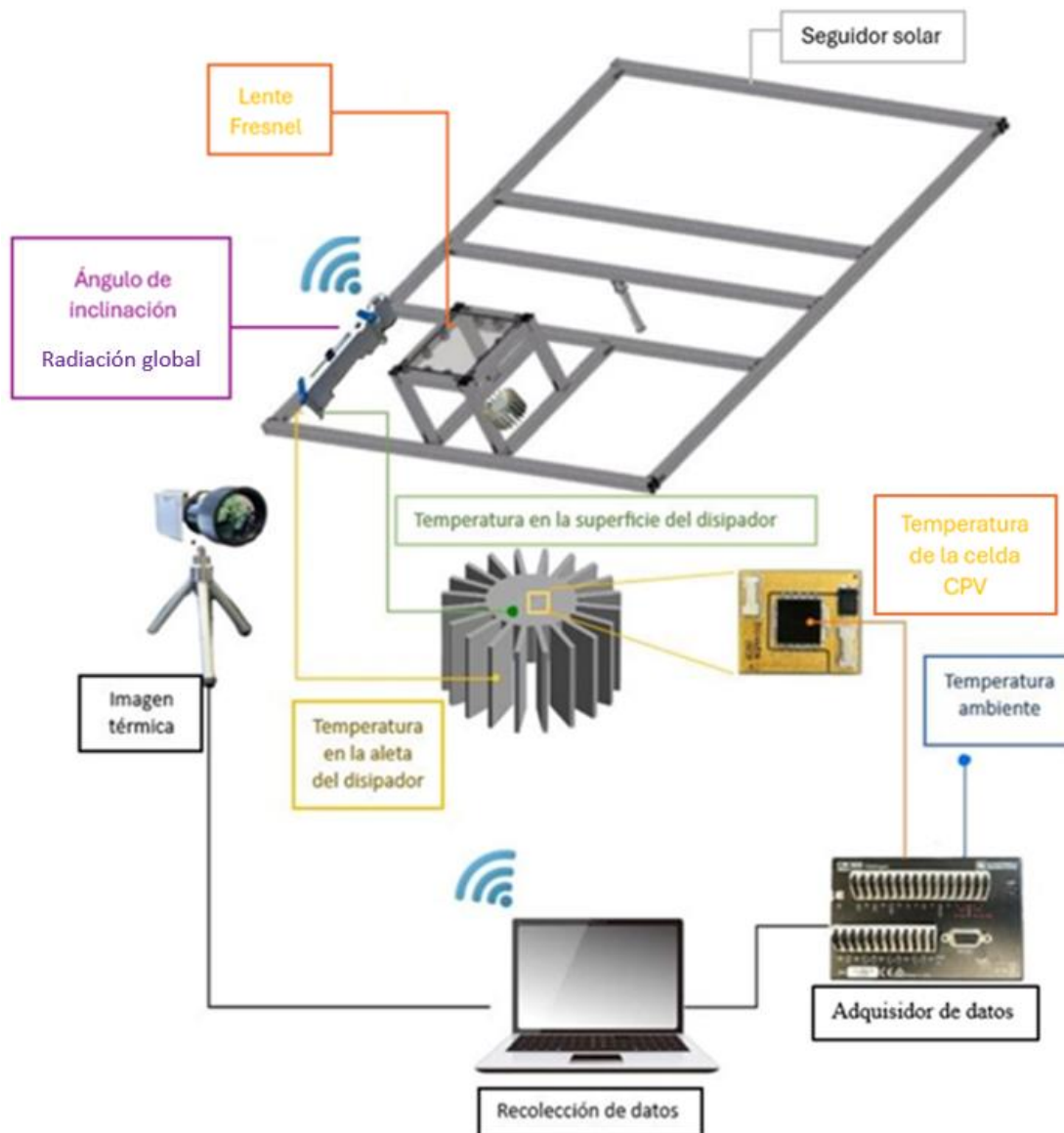


Figura 3.17 Diagrama esquemático del montaje del experimento.

La configuración para las pruebas del disipador de calor se muestra en la Figura 3.18. Consta de un sistema de seguimiento solar, donde se montará el módulo con el lente Fresnel que, a su vez, tiene incorporado el disipador de calor con la celda CPV en su superficie. Sujeto a la estructura del seguidor solar está el dispositivo SolSensor-300, que captura la radiación global en el plano inclinado y el ángulo de operación del disipador de calor. Este mismo dispositivo cuenta con dos entradas para termopares, de los cuales uno de ellos registrará la temperatura en la superficie del disipador de calor y el otro, la temperatura en una de las aletas del disipador de calor. Esta información es transmitida de forma inalámbrica a la computadora. Para monitorear la temperatura de la celda CPV y la temperatura ambiente, se utilizaron dos termopares vinculados a un adquisidor de datos CR-300, alimentado vía USB por la computadora. Por último, imágenes de campos de temperatura fueron tomadas con una

cámara térmica Optris modelo PI, colocada a un metro de distancia del disipador. Los datos se recopilaron en intervalos de 30 minutos durante las pruebas.

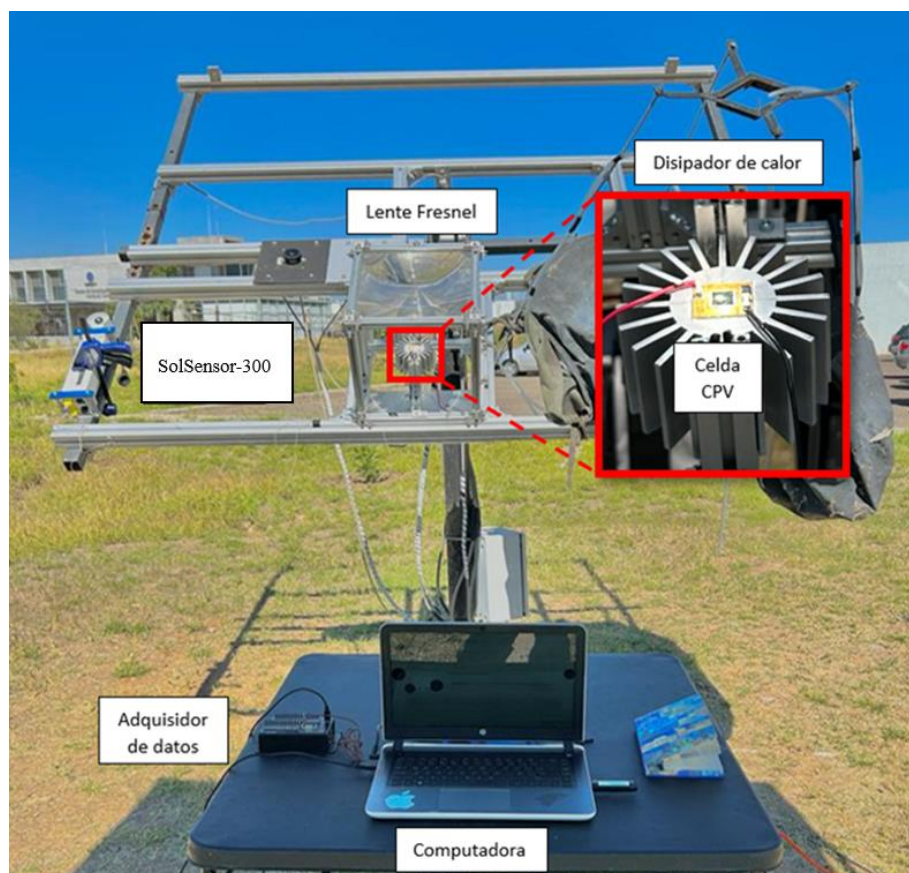


Figura 3.18 Fotografía del montaje del experimento.

Para evaluar la confiabilidad de los resultados, la Tabla 3.4, describe la incertidumbre de los instrumentos utilizados. Esto ayudará a identificar y cuantificar las posibles fuentes de error en el experimento y mejorará la reproducibilidad de este.

Tabla 3.4 Tabla de incertidumbres.

Medición	Instrumento	Incertidumbre
Temperatura	Datalogger CR300	$\pm 0.04 \%$
Temperatura	Termopar tipo K	$\pm 0.75 \%$
Temperatura	Termopar tipo J	$\pm 0.75 \%$
Ángulo de inclinación	Sol-sensor	$\pm 2 \%$
Irradiancia solar	Sol-sensor	$\pm 2 \%$
Ángulo de inclinación	Seguidor solar	$\pm 0.6^\circ$

Las mediciones de la velocidad del viento se obtuvieron de la base de datos de la estación “AGUASCALIENTES” del Servicio Meteorológico Nacional.

Capítulo 4

4.1 Simulaciones

Este capítulo describe dos técnicas fundamentales en la investigación y el diseño de sistemas ópticos y de fenómenos que involucran la dinámica de fluidos. La primera técnica es la simulación mediante dinámica de fluidos computacional, que permite analizar el comportamiento de fluidos mediante la resolución numérica de las ecuaciones que lo gobiernan. La segunda técnica, es la simulación de trazado de rayos, que analiza cómo se propaga la luz a través de sistemas ópticos. Ambas técnicas son esenciales para predecir el comportamiento de estos fenómenos y así, reducir la necesidad de pruebas físicas. También, permiten diseñar y optimizar sistemas para lograr resultados adecuados.

4.1.1. Simulación CFD

Las simulaciones de transferencia de calor se realizaron en el software de ANSYS Fluent 2023 R2, en su versión de estudiante. El objetivo de este estudio fue analizar el rendimiento del disipador de calor acoplado a una celda CPV estándar bajo el fenómeno de convección natural.

4.1.1.1. Geometría

De acuerdo con las figuras descritas en la sección 3.3, las geometrías de estudio son de dos disipadores de 20 aletas, rectas y curvas. El modelado de la celda CPV consistió en cuatro capas de dimensiones de 10 x 10 x 0.25 mm (Figura 4.1 a) y se acoplaron a la superficie de los disipadores de calor (Figura 4.1 b y c).

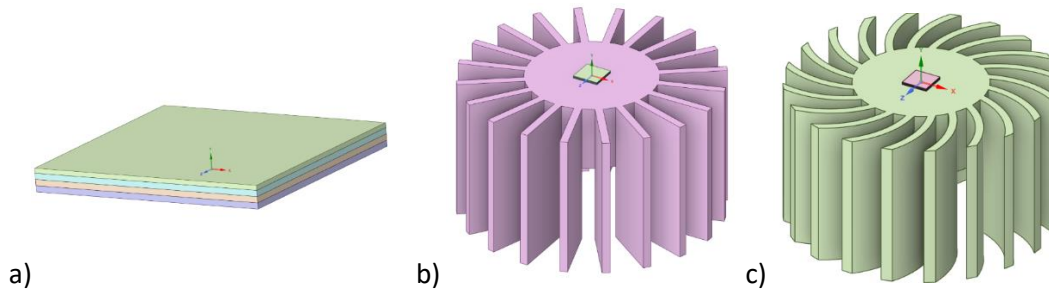


Figura 4.1 a) Capas de la celda CPV, b) celda CPV acoplada a la superficie del disipador de aletas rectas y c) celda CPV acoplada a la superficie del disipador de aletas curvas.

4.1.1.2. Región del fluido

Con el propósito de modelar y analizar el comportamiento del aire, se configuró un espacio tridimensional que rodea la región sólida de dimensiones de 300 x 400 x 400 mm (Figura 4.2).

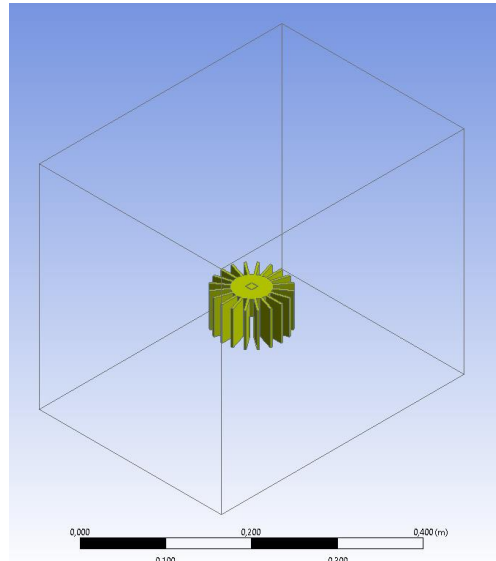


Figura 4.2 Región fluida.

Se plantearon dos escenarios de simulación, cada uno con sus correspondientes condiciones de frontera. En el primer escenario, se estableció una condición en la que la velocidad del viento se fijó en 0 m/s, lo que permitió analizar el comportamiento del sistema en ausencia de movimiento del aire (Figura 4.3 a). En el segundo escenario, se definió una condición en la que la velocidad del viento tiene un valor mayor a 0 m/s, lo que permitió analizar como el flujo del aire afectaba al sistema (Figura 4.3 b). Esto permitió evaluar el sistema en diferentes escenarios.

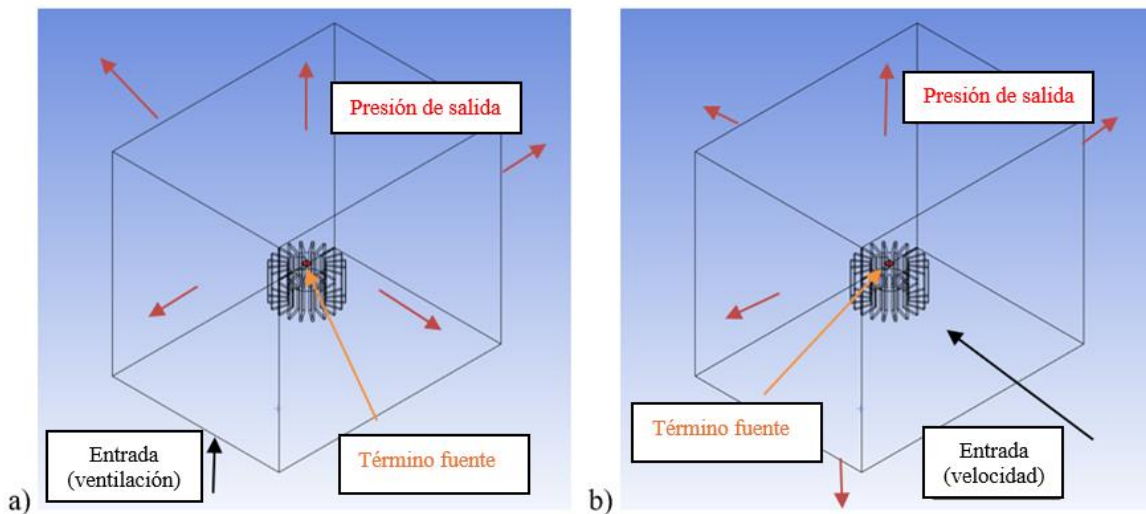


Figura 4.3 Condiciones de frontera para a) escenario con velocidad del viento igual a 0 m/s y b) escenario con velocidad del viento mayor a 0 m/s.

4.1.1.3. Mallado

Tanto la región sólida como la región fluida fueron malladas con elementos, en su mayoría, tetraédricos. Para la región sólida se emplearon elementos con un tamaño de 2.5 mm, lo que permitió una representación detallada de la geometría (Figura 4.4 a). En cuanto a la malla de la región del fluido se estableció una tasa de crecimiento de 1.2 mm desde los elementos más pequeños, hasta alcanzar los elementos más grandes de 30 mm en los límites de la región fluida (Figura 4.4 b). Esto resultó en un total aproximado de 414,000 elementos. Esta configuración permitió dirigir el análisis de transferencia de calor de manera efectiva hacia el dissipador y la celda CPV, sin incurrir en un exceso de costo computacional en las regiones del fluido que se encontraban alejadas de la geometría principal.

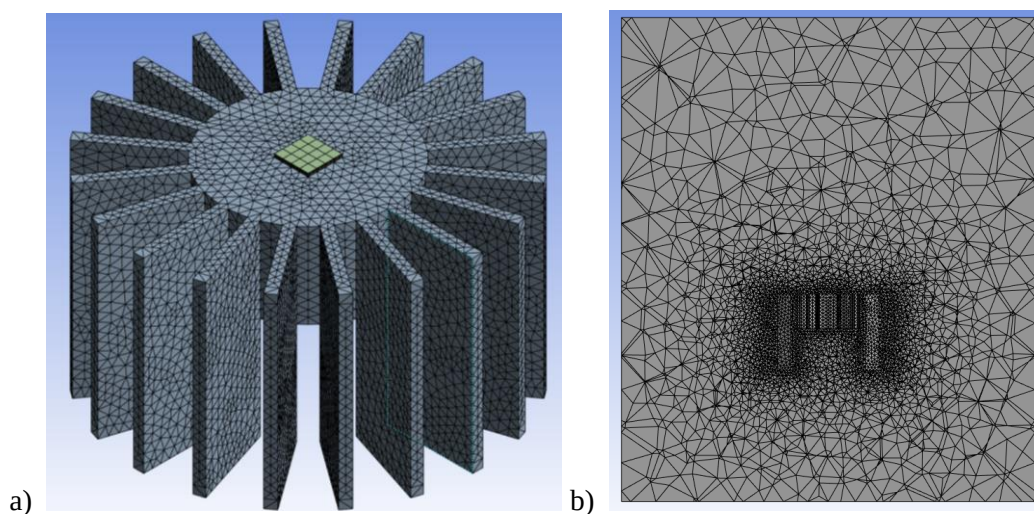


Figura 4.4 Configuración de la malla en a) región sólida y b) región del fluido

La malla toma un papel importante en la precisión y la estabilidad del cálculo numérico por lo que es imprescindible comprobar la calidad de esta. La calidad se puede analizar por tres aspectos: calidad ortogonal, asimetría y calidad de los elementos.

4.1.1.3.1. Calidad ortogonal

De acuerdo con el criterio de ortogonalidad, los peores elementos tendrán una calidad ortogonal cercana a 0 y los mejores elementos tendrán una calidad ortogonal cercana a 1 (Figura 4.5).

Espectro de métricas de malla de calidad ortogonal					
Inaceptable	Mala	Aceptable	Buena	Muy buena	Excelente
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1

Figura 4.5 Métrica de malla de calidad ortogonal.

En la Figura 4.6 se muestra una representación gráfica del número de elementos y su ortogonalidad. A pesar de la existencia de elementos con poca calidad el promedio general está por arriba de 0.75, situando la malla en una posición favorable respecto a la métrica.

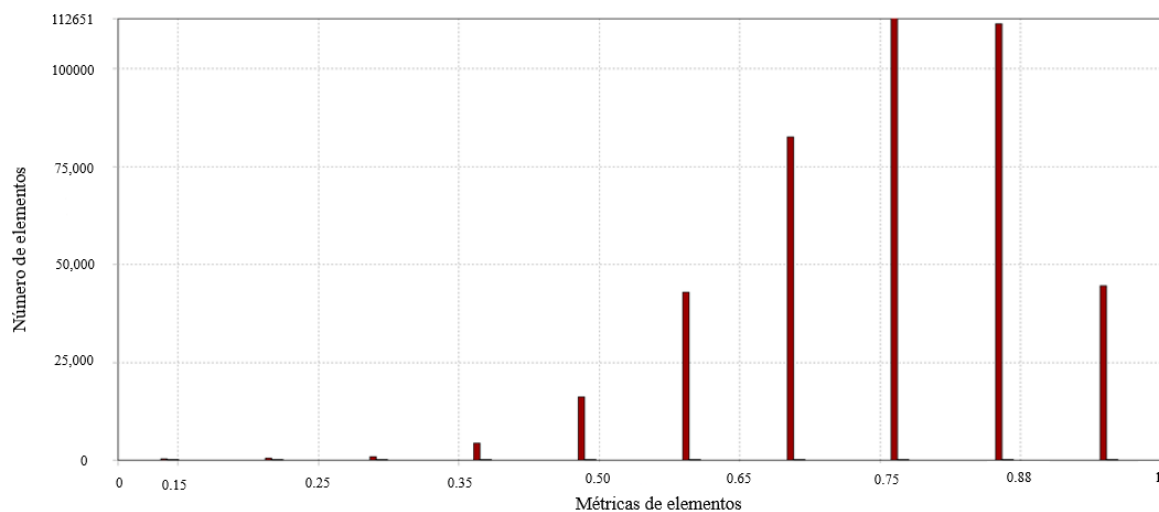


Figura 4.6 Calidad ortogonal de los elementos en la malla.

4.1.1.3.2. Asimetría

La asimetría determina qué tan cerca de un ideal (equilátero o equiangular) está una cara o un elemento (Figura 4.7).

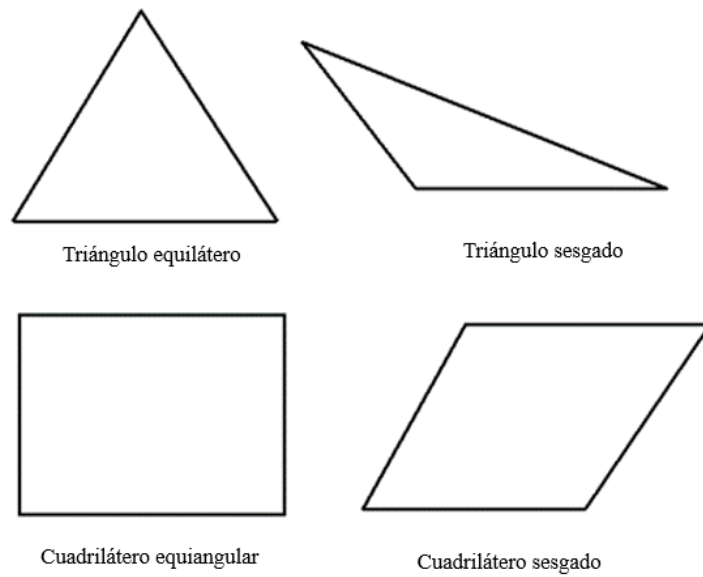


Figura 4.7 Triángulos y cuadriláteros ideales.

De acuerdo con esta definición, un elemento con un valor cercano a 0 es mejor y un elemento con valor cercano a 1 es peor (Figura 4.8).

Espectro de métricas de malla de asimetría					
Excelente	Muy buena	Buena	Aceptable	Mala	Inaceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1

Figura 4.8 Métrica de malla de asimetría.

El número de elementos en el modelo y su asimetría se pueden observar en la Figura 4.9. Con un promedio de 0.23 respecto a la métrica se puede afirmar una excelente asimetría.

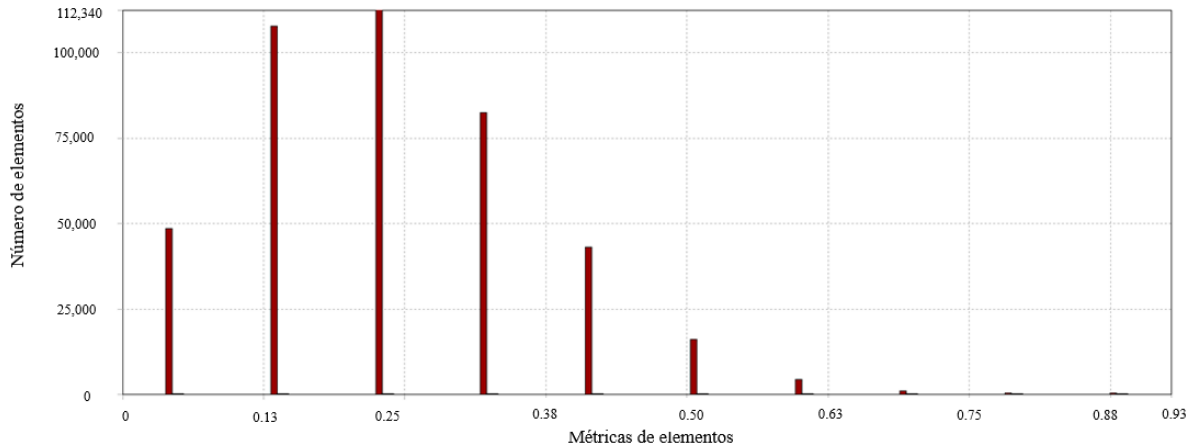


Figura 4.9 Calidad de asimetría en los elementos de la malla.

4.1.1.4. Calidad de los elementos

La calidad de los elementos se basa en la relación entre el volumen y la suma del cuadrado de las longitudes de los bordes para elementos 2D o la raíz cuadrada del cubo de la suma del cuadrado de las longitudes de las aristas para elementos 3D. La calidad del elemento es una métrica que oscila entre 0 y 1. Un valor de 1 indica un cubo o cuadrado perfecto, mientras que un valor de 0 indica que el elemento tiene un volumen cero o negativo. La Figura 4.10 muestra el número de elementos y su calidad respecto a la métrica, con un promedio de 0.82.

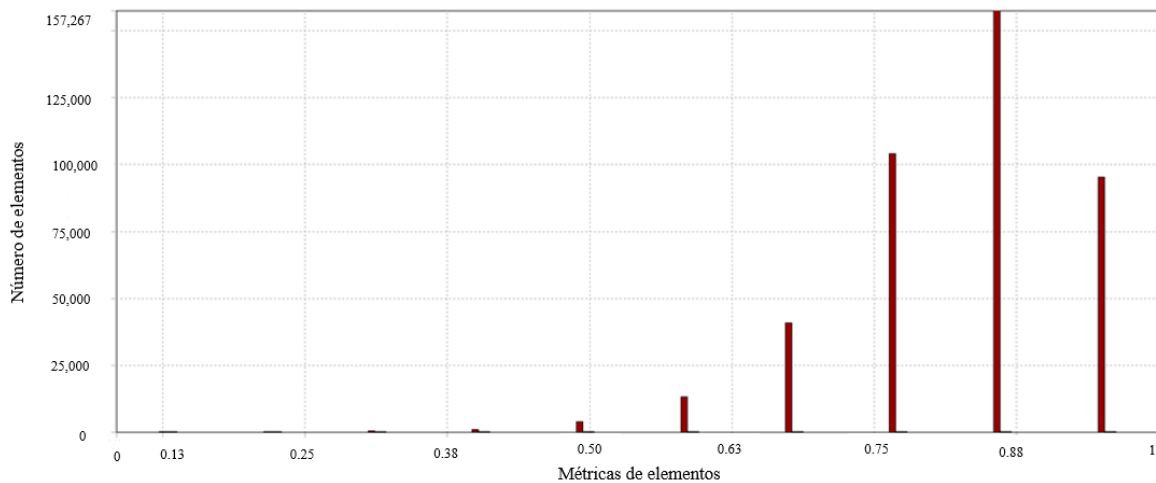


Figura 4.10 Calidad de los elementos en la malla.

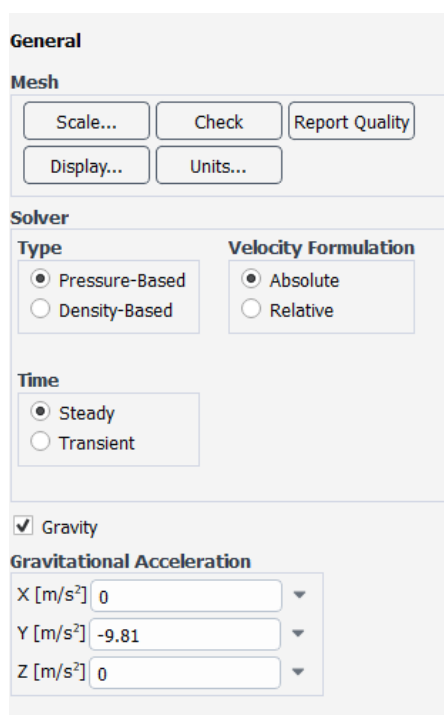
4.1.1.5. Configuración de la simulación

4.1.1.5.1. General

En este apartado (Figura 4.11) se utilizó un solucionador basado en presión, ya que los cambios en la densidad del fluido de operación no son significativos. En este modelo la presión es el parámetro principal que gobierna el comportamiento del fluido.

Se analizará el fenómeno en un estado estacionario, es decir, que la simulación alcanzará un punto de equilibrio donde las condiciones físicas como la velocidad, la presión, la temperatura, etc., permanecerán constantes a lo largo del tiempo.

En esta sección también se activará la función que simula el efecto de la gravedad, estableciendo un valor de -9.81 m/s^2 en el eje vertical.



The image shows the 'General' settings panel in ANSYS Fluent. It is divided into several sections: 'Mesh' with buttons for 'Scale...', 'Check', 'Report Quality', 'Display...', and 'Units...'; 'Solver' with 'Type' (radio buttons for 'Pressure-Based' and 'Density-Based', with 'Pressure-Based' selected) and 'Velocity Formulation' (radio buttons for 'Absolute' and 'Relative', with 'Absolute' selected); 'Time' with radio buttons for 'Steady' and 'Transient', with 'Steady' selected; a checked 'Gravity' checkbox; and 'Gravitational Acceleration' with input fields for X, Y, and Z components in m/s^2 . The X component is 0, the Y component is -9.81, and the Z component is 0.

Figura 4.11 Configuración general.

4.1.1.5.2. Modelo

Para reducir la cantidad de recursos computacionales el flujo del aire se consideró como laminar (Meng et al., 2018), ver Figura 4.12.

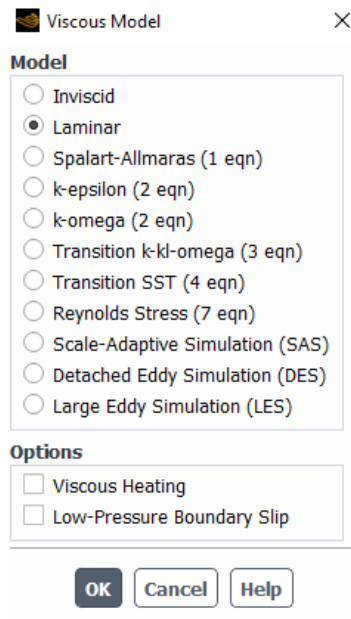


Figura 4.12 Selección del modelo de viscosidad.

4.1.1.5.3. Materiales

En este proyecto se analizará una celda CPV estándar, la cual está ensamblada por múltiples capas de distintos materiales y esta se montará en la parte superior de un disipador de aluminio (Figura 4.13). Una lista de estos materiales, junto con información sobre su espesor y sus propiedades se muestran en la Tabla 4.1.

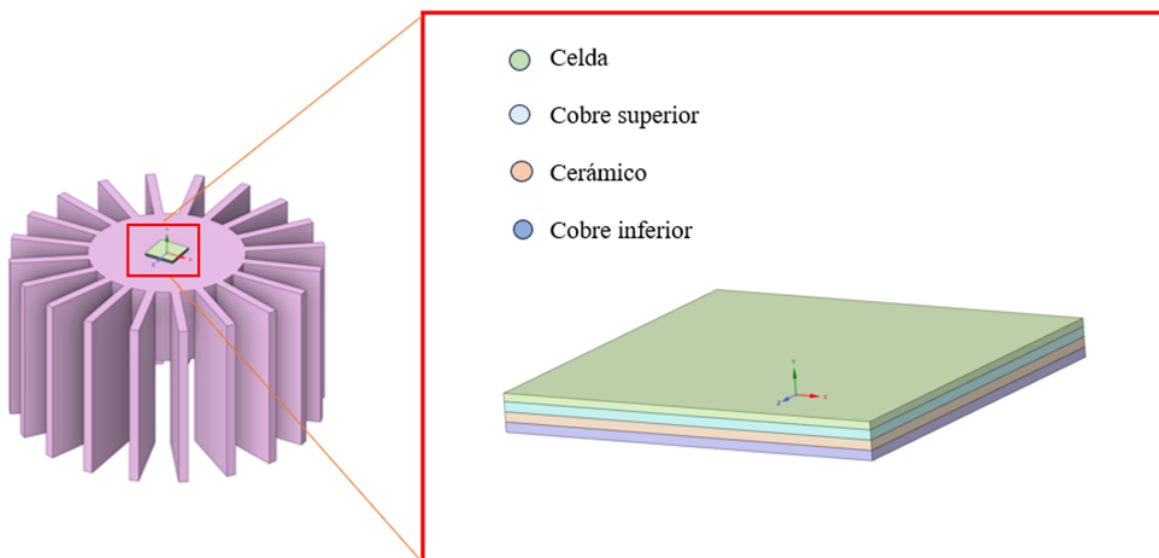


Figura 4.13 Distribución de capas de una celda CPV.

Tabla 4.1 Dimensiones y propiedades termo físicas de los materiales de la celda CPV.

Capa	Material	Espesor (mm)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Densidad ($\frac{kg}{m^3}$)	Calor específico (J/kg · K)	Conductividad térmica ($W/m^2 \cdot K$)
Celda	Ge	0.25	10	10	5323	320	60
Cobre superior	Cu	0.25	10	10	8700	385	400
Cerámico	Al ₂ O ₃	0.25	10	10	3900	900	30
Cobre inferior	Cu	0.25	10	10	8700	385	400

En la Tabla 4.2 se muestran las características del aluminio para la geometría del disipador.

Tabla 4.2 Propiedades termo físicas del aluminio.

Material	Densidad ($\frac{kg}{m^3}$)	Calor específico (J/kg · K)	Conductividad térmica ($W/m^2 \cdot K$)
Al	2719	871	202.4

Para la región del fluido se estableció el aire utilizando el modelo de Boussinesq donde, exceptuando la densidad, las propiedades del aire son constantes (Figura 4.12). Este modelo permite simular flujos donde las variaciones de densidad debido a los cambios de temperatura son relativamente pequeñas como el caso de la convección natural.

Figura 4.12 Ventana de selección y propiedades del material o fluido.

4.1.1.5.4. Cell zone conditions

Las “cell zone conditions” representan condiciones específicas que se aplican en zonas o regiones particulares para especificar comportamientos en distintas partes del modelo. Es en esta sección donde se describe la cantidad de calor que estará generando la celda CPV.

La estimación del calor por conducción en un dominio sólido está definida por la Ley de Fourier:

$$\vec{q} = -k\nabla T \quad (1)$$

Donde $\vec{q}$ es el flujo de calor cuya dirección será normal a una superficie de temperatura constante, k es la conductividad térmica de los materiales y T es la variable escalar de temperatura. Considerando la ley de conservación de energía para un estado estacionario, con un término fuente en la ecuación 1, se puede obtener la siguiente ecuación de difusión de calor para la estimación de temperatura.

$$-\nabla(k\nabla T) + \dot{q} = 0 \quad (2)$$

Donde $\dot{q}$ es el término de la fuente de calor, que corresponde al calor residual producido por la celda CPV.

$$\dot{q} = P_{calor,celda} / V \quad (3)$$

V es el volumen de la celda CPV y $P_{calor,celda}$ es la tasa de calor residual producido por la celda CPV, que, de acuerdo con (Fernández et al., 2014), es igual a:

$$P_{calor,celda} = CR * DNI * \eta_{opt} * A_{celda} * (1 - \eta_{celda}) \quad (4)$$

Donde CR es el factor de concentración, DNI es la irradiancia solar directa, η_{opt} es la eficiencia óptica del sistema, A es el área de la celda CPV y η_{celda} es la eficiencia de la celda CPV. A su vez, la eficiencia de la celda CPV está en función de una eficiencia de referencia establecida por el fabricante (η_{ref}), un coeficiente de expansión térmica ($\beta_{térmica}$), la temperatura de operación de la celda CPV (T_{celda}) y una temperatura de referencia también establecida por el fabricante (T_{ref}). Por lo tanto, es posible representar la eficiencia de la celda CPV de la siguiente forma:

$$\eta_{celda} = \eta_{ref} - [\beta_{térmica}(T_{celda} - T_{ref})] \quad (5)$$

En ese marco hay dos opciones para configurar en el software el comportamiento de la celda CPV: una es a través de la definición como función (Figura 4.13) y la otra implica resolver la ecuación e ingresar el valor como un parámetro.

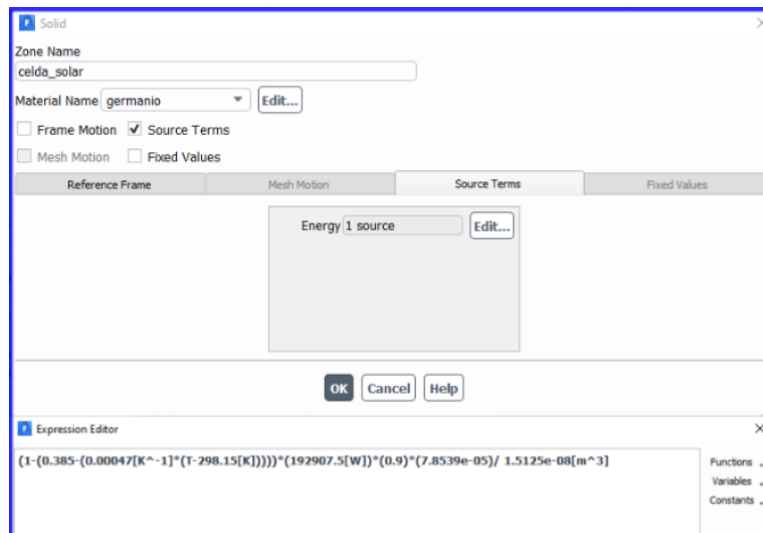


Figura 4.13 Función de generación de calor en la celda CPV (Loera, 2020).

En este proyecto se opta por la segunda alternativa, donde se resuelve la ecuación y se introduce el valor directamente (Figura 4.14).



Figura 4.14 Parámetro de generación de calor en la celda CPV.

4.1.1.5.5. Método de solución

Se hizo uso de un esquema de presión-velocidad acoplado. Este método puede llevar a una convergencia más precisa en comparación con otros métodos, aunque también puede resultar más costoso computacionalmente en términos de tiempo de simulación.

Como algoritmo para resolver la ecuación de presión-velocidad se utilizó el esquema PRESTO. Este esquema se caracteriza por ser adecuado para flujos dominados por la convección y puede ofrecer convergencia más rápida en comparación con otros métodos disponibles. Este solucionador utiliza un esquema de presión-corrector que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes de manera iterativa, actualizando las variables de flujo y presión

para llegar a una solución.

Por último, se seleccionó un esquema Second Order Upwind ya que resulta más preciso que los esquemas de primer orden (Figura 4.15).

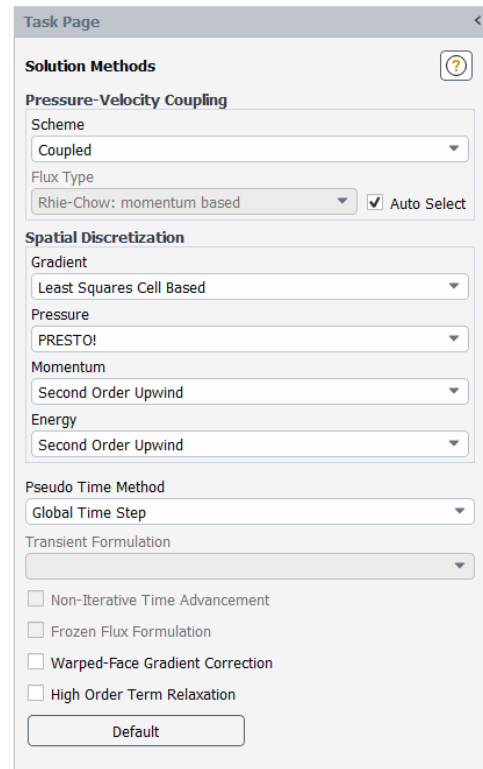


Figura 4.15 Configuración del método de solución.

4.1.2. Diseño óptico del sistema CPV

El análisis de trazado de rayos es una técnica computacional que simula la interacción de la luz o radiación electromagnética con objetos y superficies. En la industria del diseño óptico el trazado de rayos se utiliza para simular y analizar cómo se comporta la luz en sistemas ópticos como lentes o espejos, lo que resulta fundamental para optimizar la calidad y el rendimiento de estos.

Para este trabajo se realizó una simulación, usando el software Tonatiuh, con el fin de analizar la cantidad y distribución del flujo de radiación en la celda CPV ocasionada por el punto focal del lente Fresnel (Figura 4.16). Para esta simulación se consideraron los siguientes parámetros. Dado que el sistema óptico está montado en un seguidor solar, lo que permite que los rayos del sol incidan perpendicularmente en el lente Fresnel, se estableció una elevación del sol de 90°. Además, una irradiancia de 1,000 W/m² y 10,000,000 de rayos por

iteración. Respecto al lente Fresnel, las características de acuerdo con el fabricante son un diámetro de 0.31 m, una distancia focal de 0.22 m, un espesor de 0.003 m, 1.49 como índice de refracción y una transmisividad de 0.92.

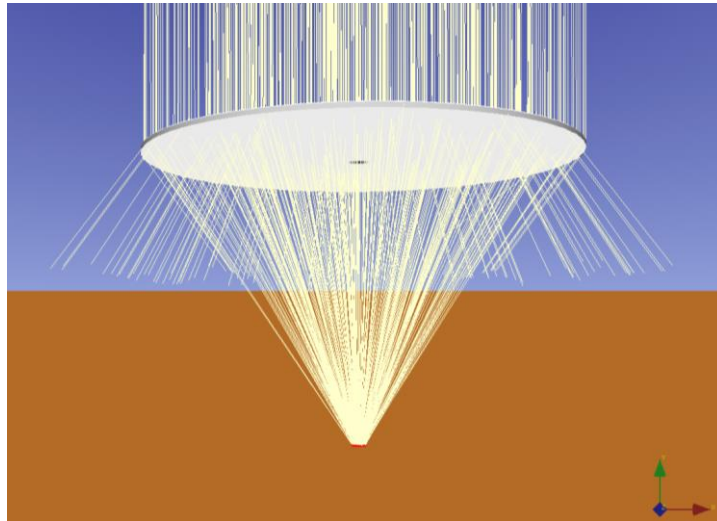


Figura 4.16 Modelo de simulación de un lente Fresnel y una celda CPV, mediante el uso del software Tonatiuh.

Capítulo 5

5.1 Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las etapas y técnicas utilizadas para el análisis del comportamiento térmico del subsistema de enfriamiento propuesto.

5.1.1. Post procesamiento

La etapa de post procesamiento en simulaciones mediante CFD permite visualizar de manera gráfica el comportamiento del fenómeno físico a evaluar analizando variables de interés como el comportamiento del fluido, temperaturas, velocidades, entre otras características, facilitando la interpretación de los resultados. Además, la información adquirida en esta etapa permite, de ser necesario, la optimización del diseño o de los componentes.

5.1.1.1. Análisis de dinámica de fluidos

El objetivo de este análisis es evaluar el comportamiento del fluido alrededor de los disipadores de calor. Evaluando características como, velocidad y dirección del fluido se puede comparar el rendimiento de cada geometría e identificar la más eficiente. Para este análisis se establecieron condiciones idénticas en ambas geometrías: 25° C de temperatura ambiente, 900 W/m² como DNI, velocidad del viento de 1.2 m/s y un ángulo de inclinación de 45°.

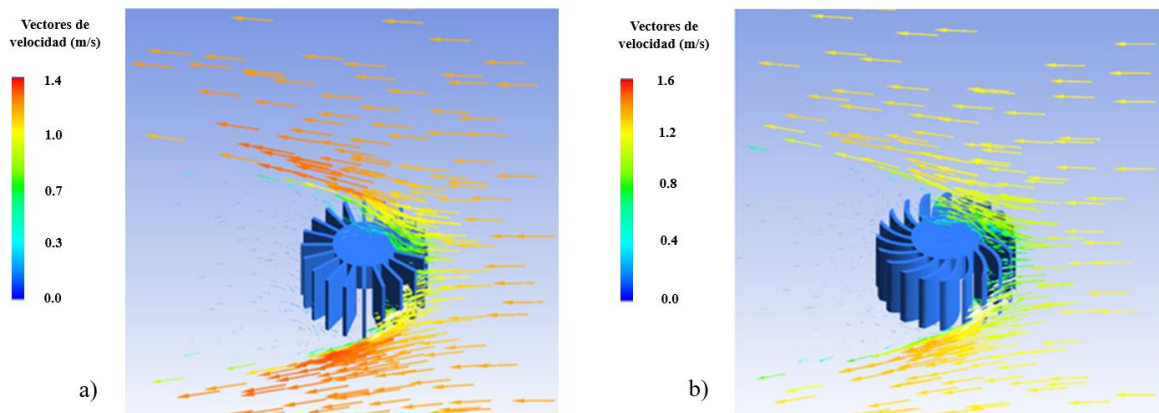


Figura 5.1 Vectores de velocidad del viento en a) disipador de aletas rectas y b) disipador de aletas curvas.

La Figura 5.1 describe los vectores de velocidad del fluido según una escala de colores. En la Figura 5.1 a), se observa que el fluido alcanza una velocidad máxima de 1.4 m/s mientras que en la Figura 5.1 b), el flujo de aire alcanza 1.6 m/s, sugiriendo que el disipador de aletas curvas tiene una mayor capacidad de mantener velocidades más altas a su alrededor, lo que podría implicar una mejor eficiencia en la disipación de calor.

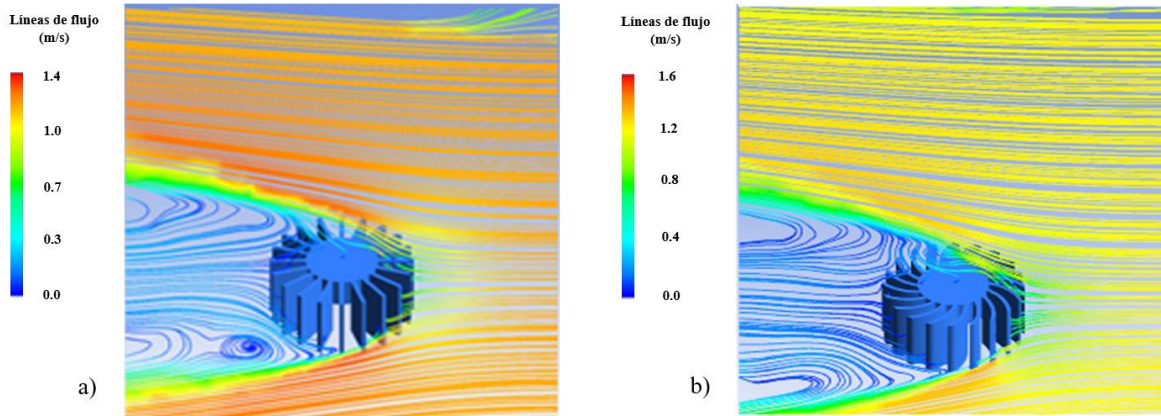


Figura 5.2 Líneas de corriente del viento en a) disipador de aletas rectas y b) disipador de aletas curvas.

Por otro lado, la Figura 5.2 describe la trayectoria del aire en ambos modelos. Las líneas azules representan las trayectorias donde la velocidad del viento es más baja. En la Figura 5.2 a), se puede observar un remolino que sugiere el estancamiento o la posible recirculación del aire, esto podría ser menos eficiente en la transferencia de calor ya que, idealmente, un flujo uniforme es deseable para disipar el calor de la celda CPV.

5.1.1.2. Análisis de transferencia de calor

Para evaluar la capacidad de ambas geometrías de mantener la celda CPV por debajo de su límite máximo de operación se realizó una simulación estableciendo los valores del caso crítico, descrito en la sección 3.3.4. Los resultados de esta simulación se ilustran en la Figura 5.3.

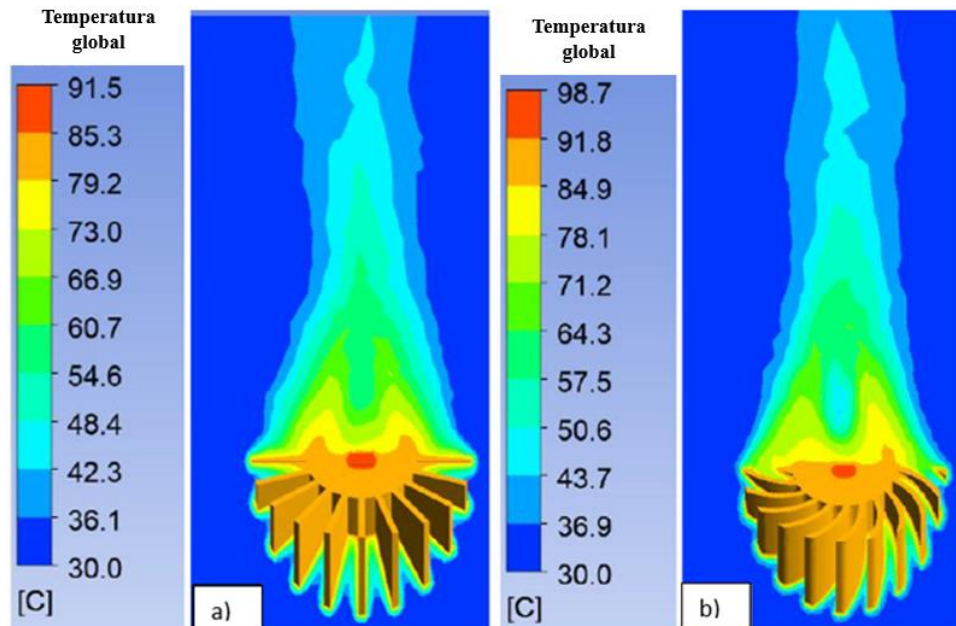


Figura 5.3 Perfil de temperatura del caso crítico en a) disipador de aletas rectas y b) disipador de aletas curvas.

Se puede observar, en ambos casos, la disipación de calor de la celda CPV desde el centro del disipador, hacia las aletas y finalmente al ambiente donde destacan las temperaturas más bajas en tonos de azul y verde. La temperatura máxima de la celda CPV en el caso del disipador de aletas rectas se reportó de 91.5 °C, mientras que en el modelo de aletas curvas fue de 98.7 °C. Si bien, en ninguno de los dos casos la celda CPV superó su temperatura máxima de operación de 100 °C se puede justificar, con estos resultados, que el disipador de calor de aletas rectas tiene un mejor desempeño térmico.

5.1.2. Simulación térmica de la celda CPV

Para el caso de las simulaciones se modelaron 43 escenarios, los cuales describen de manera general el comportamiento térmico de la celda CPV y del disipador de calor a lo largo del día. Se evaluaron los efectos de la temperatura ambiente, velocidad del viento, ángulo de inclinación y DNI. El factor de concentración solar se mantuvo constante (500 x) al igual que la eficiencia óptica del sistema (0.89) y la eficiencia de la celda CPV (0.37). Los resultados, evaluando la temperatura promedio de la celda CPV, se recopilan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Resultados de las simulaciones.

Temperatura ambiente 20 °C				
Ángulo de inclinación (°)	DNI (W/m ²)	Velocidad del viento (m/s)		
		0	1.2 (promedio)	1.9 (más frecuente)
30	1000	74.8	50.7	46.3
	900	69.6	48	43.5
45	1100	81.1	54	47.7
	1000	76.4	52.9	47.5
	900	71.7	49.7	44.8
60	900	72.3	49.5	44.6
	800	67.8	46.2	41.7

Temperatura ambiente 25 °C				
Ángulo de inclinación (°)	DNI (W/m ²)	Velocidad del viento (m/s)		
		0	1.2 (promedio)	1.9 (más frecuente)
30	1000	81	56.2	51.7
	900	75.8	53.4	48.8
45	1100	85.7	61.7	55.3
	1000	82	58.2	52.9
	900	77.5	54.8	49.9
60	900	77.7	54.6	49.6
	800	73.2	51.3	46.8

Caso crítico	
Ángulo de inclinación (°)	45
DNI (W/m ²)	1100
Velocidad del viento (m/s)	0
Temperatura ambiente (°C)	30
Temperatura de la celda (°C)	87.4

5.1.3. Análisis óptico

Los resultados de la simulación, colocando la celda CPV en el punto focal a 0.22 m del lente Fresnel, muestran que hay un promedio de 552 soles incidiendo en el centro de la celda. Sin embargo, la distribución de concentración solar no es uniforme pues no hay concentración de rayos en el área alrededor del centro de la celda (Figura 5.4).

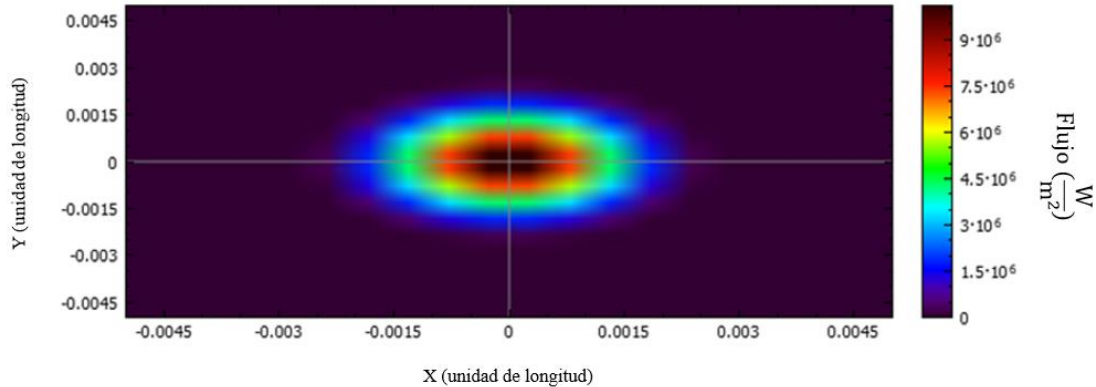


Figura 5.4 Distribución del flujo incidente en la celda a una distancia focal de 0.22 m.

Para mejorar la distribución de flujo se colocó la celda CPV a una distancia de 0.21 m del lente Fresnel, es decir, 0.01 m menor a la distancia focal establecida por el fabricante. Los resultados de esta simulación mostraron una reducción del promedio de soles incidiendo en la celda pasando de 552 a 473, sin embargo, hubo una mejora significativa en la distribución de flujo (Figura 5.5). Es importante hallar un equilibrio entre el número de concentración de soles y la distribución de flujo ya que una concentración alta puede dañar la celda y una mala distribución de flujo puede afectar la eficiencia de esta.

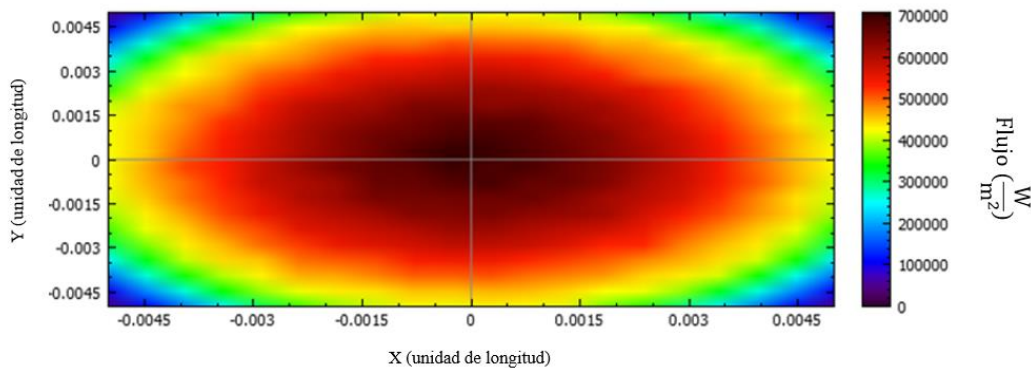


Figura 5.5 Distribución del flujo incidente en la celda a una distancia focal de 0.21 m.

En adición a la gráfica de distribución de flujo, otro parámetro que puede indicar que la distribución de flujo es la adecuada es el índice de uniformidad. Este índice, calculado por el software, indica que la distribución de flujo es uniforme a medida que se va acercando a cero (Shanmugam et al., 2022). El índice de uniformidad, a una distancia focal de 0.22 m fue de

3.04 mientras que a una distancia de 0.21 m fue de 0.28.

En resumen, este análisis fue fundamental para establecer la posición óptima de la celda CPV en relación con el lente Fresnel. Además, proporcionó una aproximación de los parámetros de operación del sistema. El equilibrio de estos factores ayuda para lograr una eficiencia adecuada.

5.1.4. Mediciones experimentales

Los experimentos se llevaron a cabo durante siete días no consecutivos en el mes de noviembre en un horario de 10:00 a.m. a 4:00 p.m. Los resultados obtenidos, respecto a la temperatura de la celda, se resumen en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Resultados obtenidos de la temperatura de la celda CPV durante la campaña experimental.

Temperatura de la celda (°C)							
Hora	nov-06	nov-07	nov-08	nov-09	nov-15	nov-16	nov-17
10:00		44.5	47.8	47.2	34.1	48.3	41.5
10:30		44.2	44.5	43.8	31.6	48.7	44.3
11:00	49.7	50.7	46.4	41.7	38.7	49.3	47.9
11:30		58.4	47.7	48.8	39.7	44.5	51.4
12:00	49.1	55.0	48.4	48.1	36.1	46.6	52.2
12:30		59.7	59.1	46.4	37.3		49.6
13:00	52.7	61.4	55.7	47.9	43.3	58.9	47.2
13:30		56.6	57.1	45.6	45.8	48.6	47.5
14:00	53.2	54.8	58.8		51.7	52.1	50.3
14:30		52.3			49.1	55.3	52.4
15:00	52.1	58.7			48.2	55.0	47.8
15:30		56.8			39.5	49.9	46.8
16:00	50.7	57.0			36.7	37.3	43.0

5.1.5. Validación

La validación es el proceso que consiste en analizar y contrastar cómo se comportan los resultados computacionales frente a los datos de las pruebas experimentales. Esto permite ajustar y mejorar los modelos, garantizando su precisión y su capacidad para predecir el comportamiento del fenómeno físico en el mundo real. Sin embargo, la imprevisibilidad y la variabilidad de factores meteorológicos hacen que la correlación entre los resultados sea más compleja ya que los modelos computacionales deben intentar representar condiciones reales que pueden ser difíciles de replicar con precisión. La Tabla 5.3 recopila algunos de los escenarios de la campaña experimental que más se aproximan a los escenarios de simulación. Además, se muestran los resultados de una segunda simulación ajustando los parámetros de acuerdo con los obtenidos en la campaña experimental. Esto permitirá calcular el error

relativo porcentual, con el que se podrá entender fácilmente la magnitud de la discrepancia entre ambos escenarios, teórico y experimental.

Tabla 5.3 Comparación entre resultados de simulación y datos experimentales.

	Ángulo de inclinación (°)	DNI (W/m ²)	Temperatura ambiente (°C)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura de la celda (°C)
Resultado de la simulación	30	1000	25	1.2	56.2
Resultado experimental (Nov/07 13:30 h)	36	1040	27.5	1.5	56.6
Resultado 2da simulación	36	1040	27.5	1.5	59.4

	Ángulo de inclinación (°)	DNI (W/m ²)	Temperatura ambiente (°C)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura de la celda (°C)
Resultado de la simulación	35	1000	25	1.2	56.2
Resultado experimental (Nov/08 12:30 h)	34.3	1050	25.9	1	59.1
Resultado 2da simulación	34.3	1050	25.9	1	63.5

	Ángulo de inclinación (°)	DNI (W/m ²)	Temperatura ambiente (°C)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura de la celda (°C)
Resultado de la simulación	45	1000	25	1.9	52.9
Resultado experimental (Nov/16 14:30 h)	44.5	1030	26.3	1.8	55.3
Resultado 2da simulación	44.5	1030	26.3	1.8	54.7

	Ángulo de inclinación (°)	DNI (W/m ²)	Temperatura ambiente (°C)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura de la celda (°C)
Resultado de la simulación	30	1000	25	1.2	56.2
Resultado experimental (Nov/16 13:00 h)	36.2	1050	25.4	1.1	58.9
Resultado 2da simulación	36.2	1050	25.4	1.1	61.2

	Ángulo de inclinación (°)	DNI (W/m ²)	Temperatura ambiente (°C)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura de la celda (°C)
Resultado de la simulación	30	1000	25	1.9	51.7
Resultado experimental (Nov/17 12:00 h)	36.7	1070	24.6	1.7	52.2
Resultado 2da simulación	36.7	1070	24.6	1.7	55.7

5.1.6. Desviación relativa porcentual

En este caso se define como “Desviación” a la diferencia entre el valor obtenido al medir una variable con relación a su valor experimental y su valor simulado. Dicho esto, la desviación relativa porcentual refleja el cociente entre el valor absoluto y el valor simulado multiplicado por 100. Matemáticamente su representación es la siguiente:

$$\text{Desviación relativa porcentual} = \frac{|\text{Valor experimental} - \text{Valor simulado}|}{\text{Valor simulado}} \times 100 \quad (6)$$

Sustituyendo los valores reportados en la tabla 5.3 en la Ecuación 6 se obtiene la desviación relativa porcentual para cada uno de los escenarios, ver Tabla 5.4.

Tabla 5.4 Cálculo de la desviación relativa porcentual.

Escenario	Temperatura simulada (°C)	Temperatura experimental (°C)	Ecuación	Desviación relativa porcentual (%)
1	59.4	56.6	$= \frac{ 56.6 - 59.4 }{59.4} * 100$	4.7
2	63.5	59.1	$= \frac{ 59.1 - 63.5 }{63.5} * 100$	6.3
3	54.7	55.3	$= \frac{ 55.3 - 54.7 }{54.7} * 100$	1.1
4	61.2	58.9	$= \frac{ 58.9 - 61.2 }{61.2} * 100$	3.8
5	55.7	52.2	$= \frac{ 52.2 - 55.7 }{55.7} * 100$	6.3

Una desviación relativa porcentual baja (< 10%) indica que la simulación se ajusta bien a los resultados experimentales mientras que una desviación relativa porcentual alta (> 10%) indica que la discrepancia entre ambos datos es significativa y, en consecuencia, indica que el modelo numérico no es el adecuado para predecir el fenómeno a evaluar.

5.1.7. Análisis de regresión múltiple

Observando la Tabla 5.3 se puede suponer que hay un conjunto de variables que se relacionan con la temperatura de la celda. Un método de pronóstico que podría ser de interés para estimar la temperatura en la celda CPV, a partir de información experimental, es el análisis de regresión múltiple. En este modelo y para este caso, el ángulo de inclinación, la temperatura ambiente, la velocidad del viento y la DNI se denominan variables independientes x o

regresores y a la temperatura de la celda se le denomina como Y o respuesta. La relación entre la respuesta Y y los regresores x es la relación lineal y se puede expresar como:

$$Y = \alpha + \beta x \quad (7)$$

Donde α es la intersección y β es la pendiente (Figura 5.6).

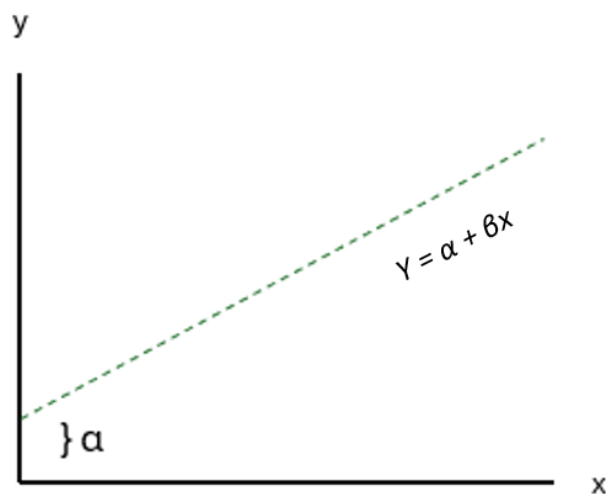


Figura 5.6 Relación lineal

En el caso de este experimento hay más de una variable independiente que ayuda a explicar Y , por lo que la estructura de la regresión múltiple puede ser expresada como:

$$Y = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 \quad (8)$$

Donde x_1 es la DNI, x_2 es el ángulo de inclinación, x_3 es la temperatura ambiente y x_4 es la velocidad del viento. El análisis de regresión múltiple se realizó mediante el software de Statgraphics 19 utilizando los datos recopilados durante los días de experimentación.

Los resultados de ajustar un modelo de regresión múltiple para describir la relación entre la temperatura de la celda y las variables independientes se describen en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5 Resultados del análisis de regresión múltiple.

Parámetro	Estimación	Estadístico T	Valor P
<i>Constante</i>	-47.3937	-2.5117	0.0144
<i>DNI</i>	0.0671	4.2511	0.0001
<i>Inclinación</i>	0.0264	0.3024	0.0763
<i>Temperatura ambiente</i>	1.3583	9.3340	0.0000
<i>Velocidad del viento</i>	-5.7645	-4.4573	0.0000

R^2	64.13%
Error estándar	3.9864
Valor P (ANOVA)	0.0000

Estos resultados indican que existe una relación estadísticamente significativa ($p > 0.05$) entre las variables. El valor del estadístico R^2 indica que el modelo explica 64.13 % de la variabilidad de los resultados de la temperatura de la celda. El error estándar de 3.9864, puede usarse para establecer intervalos de confianza al predecir nuevas observaciones. Por último, puesto que el valor P del ángulo de inclinación es mayor o igual que 0.05, se concluye que ese término no es estadísticamente significativo ($p > 0.05$) para el cálculo de la temperatura de la celda.

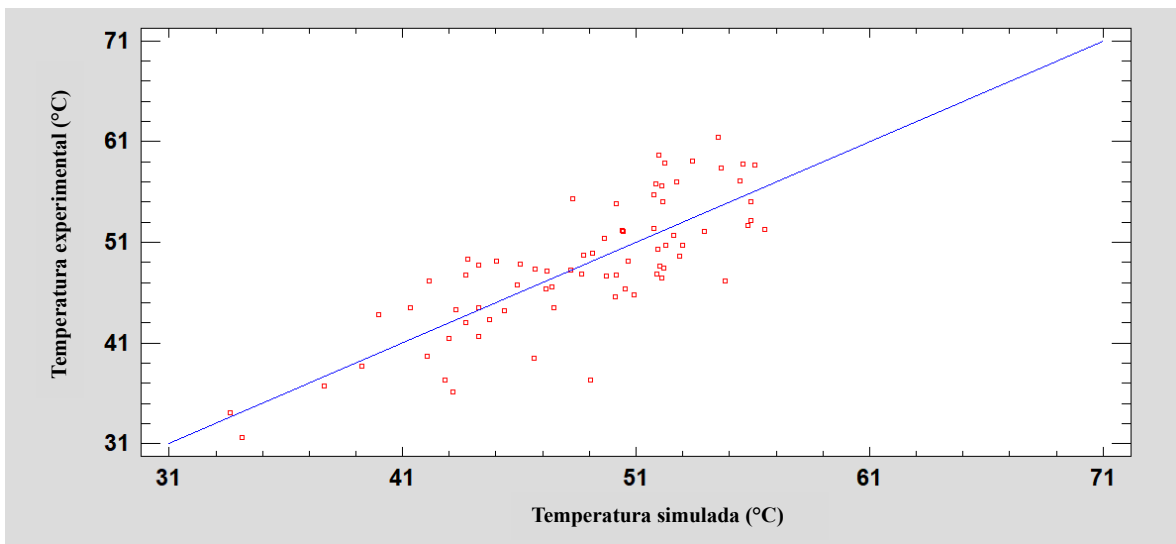


Figura 5.7 Relación entre la temperatura simulada, calculada con la Ecuación 8, y la temperatura experimental.

Sustituyendo la estimación de los parámetros en la Ecuación 8 la nueva ecuación para estimar la temperatura de la celda se expresaría como:

$$Y = -47.3937 + 0.0671 X_1 + 0.0264 X_2 + 1.3583 X_3 - 5.7645 X_4 \quad (9)$$

5.2. Discusión

Se analizaron los resultados obtenidos durante el diseño y la evaluación del disipador de calor en condiciones ambientales reales. Respecto al diseño, los análisis de dinámica de fluidos sugieren que la geometría del disipador de calor puede optimizarse aún más para lograr una distribución uniforme del flujo del fluido, lo que permitiría mejorar su eficiencia térmica. Durante la etapa experimental, condiciones climáticas como lluvias y nubosidad interrumpieron o imposibilitaron el monitoreo del sistema CPV en algunos momentos. Al

calcular el error relativo porcentual entre los resultados de simulación y los datos experimentales, se demostró la fiabilidad del modelo numérico empleado, lo cual coincide con estudios previos que han utilizado esta metodología (Zaghloul, 2021; Valera, 2019; AlFalah, 2020). Los resultados de las mediciones experimentales respecto a la temperatura de la celda CPV mostraron que el disipador de calor cumple con su propósito de mitigación térmica de manera efectiva, manteniendo una temperatura en la celda CPV por debajo de los 100 °C. Aunque resulta complejo comparar estos resultados directamente con la literatura, ya que varios estudios se basan en características diversas, como la ubicación geográfica, las condiciones controladas de experimentación en interiores, o factores de concentración distintos, los datos obtenidos aquí sugieren que la eficiencia del disipador depende, en gran medida, de la irradiancia solar directa, la temperatura ambiente, la velocidad del viento y el ángulo de inclinación. Estos factores coinciden con los señalados en investigaciones previas como determinantes clave en la acumulación de calor en celdas CPV (Zaghloul, 2021; Meng, 2018).

Capítulo 6

6.1 Conclusión y trabajo a futuro

En esta sección se presentan conclusiones derivadas del diseño y evaluación de los disipadores de calor propuestos para sistemas fotovoltaicos de concentración. Este trabajo se enfocó en identificar los factores que pueden afectar la disipación de la temperatura en la celda CPV y en evaluar la efectividad del diseño de los disipadores mediante simulaciones de dinámica de fluidos computacional y pruebas experimentales.

El análisis de transferencia de calor demostró que el diseño del disipador de calor de aletas rectas tuvo un mejor desempeño térmico, manteniendo la celda CPV 7.2 °C por debajo de la temperatura reportada con el disipador de aletas curvas.

El método de fundición, propuesto inicialmente para la manufactura del disipador de calor, no resultó viable debido a que las dificultades técnicas y la compleja geometría del disipador impedirían la obtención de un producto que cumpliera con las especificaciones requeridas. Por lo tanto, se decidió optar por un proceso de maquinado. Haciendo uso de torno y fresadora se logró fabricar una pieza con la precisión y la calidad necesarias para su evaluación.

Las pruebas experimentales confirmaron que el disipador de calor propuesto es capaz de mantener la temperatura de la celda CPV por debajo de su límite máximo de operación demostrando la efectividad del diseño y asegurando su funcionamiento bajo las condiciones ambientales evaluadas.

Al comparar los resultados experimentales con los resultados obtenidos mediante simulación CFD y calcular la desviación relativa porcentual, se validó la fiabilidad del modelo de simulación como una herramienta confiable para predecir el comportamiento térmico del subsistema de enfriamiento propuesto.

De acuerdo con el análisis de regresión múltiple, se determinó que las variables que influyen significativamente en la disipación de calor son, en orden de mayor a menor impacto, la irradiancia solar directa, la temperatura ambiente, la velocidad del viento y por último el ángulo de inclinación del disipador de calor.

Se recomienda realizar más pruebas en los meses restantes del año para evaluar el comportamiento del disipador de calor bajo distintas condiciones climáticas. Además, es necesario evaluar la eficiencia eléctrica del sistema y considerar otro método de manufactura para reducir el costo de producción del disipador de calor.

Bibliografía

- Aldossary, A., Mahmoud, S., & AL-Dadah, R. (2016). Technical feasibility study of passive and active cooling for concentrator PV in harsh environment. *Applied Thermal Engineering*, 100, 490–500. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.02.023
- Angulo-Calderón, M., Salgado-Tránsito, I., Trejo-Zúñiga, I., Paredes-Orta, C., Kesthkar, S., & Díaz-Ponce, A. (2022) Development and Accuracy Assessment of a High Precision Dual-Axis Pre-Commercial Solar Tracker for Concentrating Photovoltaic Modules. <https://doi.org/10.3390/app12052625>
- Burhan, M., Shahzad, M. W., & Ng, K. C. (2017). Long-term performance potential of concentrated photovoltaic (CPV) systems. *Energy Conversion And Management*, 148, 90-99. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.05.072>
- Chen, Y., & Chiang, H. (2015). Design of the Secondary Optical Elements for Concentrated Photovoltaic Units with Fresnel Lenses. *Applied Sciences*, 5(4), 770-786. <https://doi.org/10.3390/app5040770>
- Do, K. H., Kim, T. H., Han, Y.-S., Choi, B.-I., & Kim, M.-B. (2012). General correlation of a natural convective heat sink with plate-fins for high concentrating photovoltaic module cooling. *Solar Energy*, 86(9), 2725–2734. doi:10.1016/j.solener.2012.06.010
- Du, B., Hu, E., & Kolhe, M. (2012). Performance analysis of water cooled concentrated photovoltaic (CPV) system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(9), 6732–6736. doi:10.1016/j.rser.2012.09.007
- Fernández, E. F., Rodrigo, P., Almonacid, F., & Pérez-Higueras, P. (2014). A method for estimating cell temperature at the maximum power point of a HCPV module under actual operating conditions. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 124, 159–165. doi:10.1016/j.solmat.2014.01.050
- Fernández, E. F., Almonacid, F., Rodrigo, P., & Pérez-Higueras, P. (2014). Calculation of the cell temperature of a high concentrator photovoltaic (HCPV) module: A study and comparison of different methods. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 121, 144–151. doi:10.1016/j.solmat.2013.11.009
- Fu, L., Leutz, R., & Annen, H. P. (2010). Secondary optics for Fresnel lens solar concentrators. *Proceedings Of SPIE, The International Society For Optical Engineering/Proceedings Of SPIE*, 7785, 778509. <https://doi.org/10.1117/12.860438>
- González-Camarillo, H., Romero, E. A., Rábago, C. P., López, R. E. C., Gutiérrez, R. G., & Estrada, C. (2023). Sistema de concentración solar fotovoltaica para la caracterización de celdas fotovoltaicas de alta eficiencia. *Revista de Energías Renovables*, 7(44). <https://doi.org/10.59730/rer.v7n44a1>

- H.A. Refaey., M.A. Abdelrahman., Mathkar A. Alharthi., Samir Bendoukha., Said Ghani Khan., & Mohamed Emam. (2022). Passive cooling of highly-concentrator triple-junction solar cell using a straight-finned heat sink: An experimental investigation. *Case Studies in Thermal Engineering*. doi.org/10.1016/j.csite.2022.102521
- Javier, N. M. A., G. N. P., & F. P. (2020). *Introducción a la mecánica de fluidos computacional*. Prensas de la Universidad de Zaragoza
- José, A., Roque, C., Antonio, C. & Manuel, C. (2009). *Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables*. España: Pearson. pp. 45-47
- Luo, Q., Li, P., Cai, L., Chen, X., Yan, H., Zhu., & Zhang, Q. (2019). Experimental investigation on the heat dissipation performance of flared-fin heat sinks for concentration photovoltaic modules. *Applied Thermal Engineering*. doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.04.076
- Meng, X., Zhu, J., Wei, X., & Yan, Y. (2018). Natural convection heat transfer of a straight-fin heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 123, 561–568. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.002
- Micheli, L., Senthilarasu, S., Reddy, K. S., & Mallick, T. K. (2015). Applicability of silicon micro-finned heat sinks for 500× concentrating photovoltaics systems. *Journal Of Materials Science*, 50(16), 5378-5388. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-9065-2>
- Natarajan, S. K., Mallick, T. K., Katz, M., & Weingaertner, S. (2011). Numerical investigations of solar cell temperature for photovoltaic concentrator system with and without passive cooling arrangements. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(12), 2514–2521. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2011.06.014
- Radwan, A., Emam, M., & Ahmed, M. (2018). Comparative Study of Active and Passive Cooling Techniques for Concentrated Photovoltaic Systems. *Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions*, 475–505. doi:10.1016/b978-0-12-813734-5.00027-5
- Royne, A., Dey, C., & Mills, D. (2005). Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: a critical review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 86(4), 451–483. doi:10.1016/j.solmat.2004.09.003
- Shanmugam, M., & Maganti, L. S. (2022). Evaluation of heat flux distribution characteristics of a concentrated solar dish collector with different geometric indices. *IOP conference series*, 1100(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1100/1/012001>
- Theristis, M., & O'Donovan, T. S. (2015). Electrical-thermal analysis of III–V triple-junction solar cells under variable spectra and ambient temperatures. *Solar Energy*, 118, 533–546. doi:10.1016/j.solener.2015.06.003
- Valera, A., Fernández, E. F., Rodrigo, P. M., & Almonacid, F. (2019). Feasibility of flat-plate heat-sinks using microscale solar cells up to 10,000 suns concentrations. *Solar Energy*, 181, 361–371. doi:10.1016/j.solener.2019.02.013

- Wu, Y., Cui, J., Xu, X., & Deng, D. (2021) Experimental study on active cooling for concentrating photovoltaic cells working at high concentration ratios. *Int J Energy Res.* 2021; 45: 10682–10695. <https://doi.org/10.1002/er.6553>
- Xiao, M., Tang, L., Zhang, X., Lun, I., & Yuan, Y. (2018). A Review on Recent Development of Cooling Technologies for Concentrated Photovoltaics (CPV) Systems. *Energies*, 11(12), 3416. doi:10.3390/en11123416
- Xie, W., Dai, Y., Wang, R., & Sumathy, K. (2011). Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 2588-2606. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.03.031>
- Zaghloul, H., Emam, M., Abdelrahman, M. A., & Abd Rabbo, M. F. (2021). Optimization and parametric analysis of a multi-junction high-concentrator PV cell combined with a straight fins heat sink. *Energy Conversion and Management*, 243, 114382. doi:10.1016/j.enconman.2021.114382
- Zubeer, S. A., & Ali, O. M. (2021). Performance analysis and electrical production of photovoltaic modules using active cooling system and reflectors. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 2009–2016. doi:10.1016/j.asej.2020.09.022

HOJA DE VOTOS APROBATORIOS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA

PROGRAMAS EDUCATIVOS DE CALIDAD RECONOCIDOS POR CIEES, CACEI Y CONAH
SGI Certificada en la norma ISO 9001:2015 e ISO 21001:2015

FORMATO T-2
NOMBRAMIENTO DE COMISIÓN REVISORA
Y DICTAMEN DE REVISIÓN
Cuernavaca, Mor., a 21 de agosto de 2024.

DR. MOISÉS MONTIEL GONZÁLEZ
DR. ESTEBAN MONTIEL PALACIOS
DRA. MARIANA ROMERO AGUILAR
DR. IVÁN SALGADO TRÁNSITO
DRA. MARÍA MAGDALENA MORALES GUILLÉN
P R E S E N T E

Por este conducto, me permito informarle que ha sido asignado como integrante de la comisión revisora de la tesis que presenta FRANCISCO JAVIER ALVARADO REYES, titulada: Optimización de la Eficiencia Energética del Ciclo de Refrigeración de un Sistema Fotovoltaico de Concentración Solar, realizada bajo la dirección del Dr. Moisés Montiel González, del Programa Educativo de la Maestría en Ingeniería Ambiental y Tecnologías Sustentables. Agradezco su valiosa participación en esta Comisión y quedo a sus órdenes para cualquier aclaración o duda al respecto.

ATENTAMENTE
Por una humanidad culta

MTRA. ANGÉLICA GALINDO FLORES
DIRECTORA INTERINA

D I C T A M E N

MTRA. ANGÉLICA GALINDO FLORES
DIRECTORA INTERINA DE LA FACULTAD
DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA
P R E S E N T E

En respuesta a su amable solicitud para formar parte de la Comisión Revisora de la tesis mencionada y una vez realizada la revisión correspondiente, me permito informarle que mi VOTO es:

D I C T A M E N

NOMBRE	VOTO	FIRMA
DR. MOISÉS MONTIEL GONZÁLEZ	APROBADO	
DR. ESTEBAN MONTIEL PALACIOS	APROBADO	
DRA. MARIANA ROMERO AGUILAR	APROBADO	
DR. IVÁN SALGADO TRÁNSITO	APROBADO	
DRA. MARÍA MAGDALENA MORALES GUILLÉN	APROBADO	

Se anexan firmas electrónicas



Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209, Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería, Tel. (777) 329 70 00, Ext. 7039/ fcqei@uaem.mx

UAEM
RECTORÍA
2023-2029



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

ANGELICA GALINDO FLORES | Fecha:2024-09-17 08:46:15 | FIRMANTE

mBQilMPweqvj+s1z6jo2FePhdNLDPGysNbhOBQx4cUHocyryxT4l/anKkecoN0npJTd3wUrdoGKJCNQitV6mjn7da1GC5vA1Sk8IEzbtELqFJu96YIQIBrdXBKP//geZyglIMDxY4YK
aRIJTROZBe2ZLhHGCybRlbwSVx7VXjJwW5AtQxgJQ79wzWhQVCliaqx6anCNZZfDuyFc9bn7zZh07k25FoJed8KKS7jX2hR3+BomjCs0v02BaVmyF8RWrw733HZ8xhCn1Bl2e
WVhaRox14qe00odLFo8+KV/Psfi6BNxD12DCdMpl+IsrYekTm3YAMGcZjVQfTnpl8A==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



46NHoc51D

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/STcRhlcTl7Cl5Q0hTijQ7gz2NnnVIOyP>



UAEM
RECTORÍA
2023-2029



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

IVAN SALGADO TRANSITO | Fecha:2024-09-18 16:41:15 | FIRMANTE

hpAXKZJK6In2baGL9AyknbyMDKlo95AT9d9IVc5DKDcDmUHgSgXtgLjrm+Kgvdm4J68mrRgXA+F7Pc5Kkb50V59eXQhOUBTxJMSPWf2b2+sP1984JGYRG01rQMSr0GLoL7csWUJuoLYT1eHe/WkytlyNzbq+PL9xOxRmf3/CyTC+p5vluWY1hhpn2Qtp7WCBPKUEdeAJ/9s6QGQTPWWPH6Uo3m7HOSb8SoyVpmTIVIAePeODgGoB4dTMsqDJ5VHdd778to8M8df7BJ0hKdpTmtp6b/K4bldi5+AkLsialqAu6izo29tYm0ZLDJ34bU5UHWK61q0Rb4IOb6r0Q==

MARÍA MAGDALENA MORALES GUILLÉN | Fecha:2024-09-19 10:02:46 | FIRMANTE

YxzX1pd9nSxm/vuLayDzekAe0A0dTPi/BtAYrM4UMX/Fx5p0+kqv0nOm+LnjnYP2AGOLeCpOzFse1RQ00s3/hCONn086aFkkwEMaoAHEJWY78Ofx3V3AG1S'Yh2OuYV0dCfG8++/KXMM1rwYcNbnMCHlilXSnkgn4aGkYokR02kUEm+ogU30suAdZNUJzJqBdl0lWnpATRK7R1nvTTSJkmVKVdDyqCor4FE0vxdUCTJBbCpolfAFRIfybByN6gBWG89Z1N7thALUd13Z12Ppr4YV2BVMYYJmVamsB4Q4glbZCzoH6bJQ2Y6CuD2hs4EZEFSHGCAIRKXgAXJMYUuW==

ESTEBAN MONTIEL PALACIOS | Fecha:2024-09-20 13:00:59 | FIRMANTE

WT8UPJYc0RVkLmOdZn7jaGxgoSr34NqztRmfmcm9dHXsUCAH238KH1M1u4rRpACyEIX7oaXeaAukg1cWc2ZufE+AwNgAlbUqXEc74nnEDYJH8OG0IGFQnrdDULFz7Q71f0eaCyxM9CLIRbtahbcE2zpCO8UTQZJCWvTeoSkkwGUhcbUB0lnZgOHRwGNhdeCUHxJHqWrWR806SQVFJgrLCGKYmradsELE1us4dRgvQc5R9Xn8PN2GNyuHEXuy3navLsQIFtVQuYEslY1167+fx8R/QyPoldSBc3BhR8Y11VDtG3yogZ8r8Jza1Y9Hppky9BpzYy/+pJsX+rtjlyA==

MARIANA ROMERO AGUILAR | Fecha:2024-09-23 13:04:21 | FIRMANTE

avfP8XSMojuz/K6EYxqt1QPHGrRrKYNbE8QSA5ZgwsqV0DBFpsf46yYYL4UJT60E/hqtYbDl8MFGTLeqv/qjTExvjCr6/2xhQR7Nz5dGQV2XEbcaC1nuA4U2pd7TQa3Lm4tVtGsyLaroLdW7jaFgU9pfn3azkJSyyM5TY+9BH4UE4mvdNUaTqBQCQKEJG2tvHy/KzU8ruVnCAwL02VUa/02T4WEVzOBfYQVUxYFaekmwqaObroPjt7ThidCfVZmLMFO+tfUooYVVUFOdq+eNh4M6gUR99fGeF11HBByftx03r1b1/KVil+S/P0bSIRokv7JnNuCd2d03pO116sQ==

MOISES MONTIEL GONZALEZ | Fecha:2024-10-07 09:12:32 | FIRMANTE

Y4VjsIAFFI3BckV7e65T08qVhDsa4yvBDT4ITHReltXEKwD8sOZKAJNzdkHaNVXNdiE6D6PXANvY6WZvAkVmsqQDslUihCzoJhFousFJ354x3n0YXQ1fEJzS1F1aXJbl388RMvkWdN0BPX5yZTvc8Hnq+M2wrmsbG548NITvIK2O6eybbnCKISe1+GkzPmHh4ilyJLYKvbsarVdn+BsbxJranFHU+umgLOc7MLX0cl+DESsoJomRm3stW8U39WBAgFbJOBCtr+kMclR33Lal/WdxCih/KRzpxMX7/PsmiDo3RP06wUTnafy7ue1+QB07fJctUKK2+Z2VzryA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



EQMF67Dac

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/vksKIMovzaUskMv0uthSod4IR40N8dv9>



UAEM
RECTORÍA
2023-2029