



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos

Naturales no Renovables

Carrera de Ingeniería Electromecánica

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO
SUPERFICIAL DE PANELES FOTOVOLTAICOS MEDIANTE
CORRIENTE DE AIRE**

**Trabajo de Titulación, previo a la
obtención del título de Ingeniero
Electromecánico**

AUTOR:

Patricio Fernando Lafebre Álvarez

DIRECTOR:

Ing. Byron Agustín Solórzano Castillo, Mg. Sc.

Loja – Ecuador

2024

Loja, 08 de septiembre de 2023

Ing. Byron Agustín Solórzano Castillo

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo proceso de la elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **DISEÑO CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO SUPERFICIAL DE PANELES FOTOVOLTAICOS MEDIANTE CORRIENTE DE AIRE**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Electromecánico**, de la autoría del estudiante **Patricio Fernando Lafebre Álvarez**, con **cédula de identidad Nro. 1150407672**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.

Ing. Byron Agustín Solórzano Castillo

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **Patricio Fernando Lafebre Álvarez**, declaro ser el autor del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos y acciones legales por el contenido del mismo. Adicionalmente, acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi Trabajo de Titulación en el Repositorio Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:



Cédula de identidad: 1150407672

Fecha: 02 de enero de 2024

Correo electrónico: pflafebrea@unl.edu.ec

Teléfono: 0985063890

Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Titulación.

Yo, **Patricio Fernando Lafebre Álvarez**, declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado: **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO SUPERFICIAL DE PANELES FOTOVOLTAICOS MEDIANTE CORRIENTE DE AIRE**, como requisito para optar por el título de **Ingeniero electromecánico**; autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad. La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, suscribo, en la ciudad de Loja, a los dos días del mes de enero del dos mil veinticuatro.

Firma: 

Autor: Patricio Fernando Lafebre Álvarez

Cédula de identidad: 1150407672

Dirección: El Electricista - Loja

Correo electrónico: pflafebrea@unl.edu.ec

Teléfono: 0985063890

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del Trabajo de Titulación: Ing. Byron Agustín Solórzano Castillo, Mg. Sc.

Dedicatoria

Este Trabajo de Titulación va dedicado de manera muy especial para mis padres, Oscar y Mercedes por su apoyo incondicional, durante mi proceso de formación académica. A mi hijo Anthony y mi compañera de vida Doris. A mi familia y amigos por brindarme esa ayuda y motivación para seguir adelante. Con profunda reverencia y humildad, dedico esta investigación a ti, Dios eterno y todopoderoso

Patricio Fernando Lafebre Álvarez

Agradecimientos

Expreso mi agradecimiento de manera muy especial al, Ing. Byron Agustín Solorsano. Su dedicación, experiencia y guía han sido fundamentales para el desarrollo y éxito de mi investigación. Agradezco su aporte en conocimientos y habilidades, así como su constante disposición para aclarar mis dudas y brindarme una dirección clara en cada etapa de este trabajo de investigación.

A mis docentes de la carrera de Ingeniería Electromecánica por su dedicación y por compartir sus conocimientos, quienes han desempeñado un papel fundamental en mi formación académica y personal. Aprecio su compromiso con la educación y su contribución a mi crecimiento profesional.

Patricio Fernando Lafebre Álvarez

Índice de contenidos

Portada	i
Autoría	iii
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Índice de contenidos	vii
Índice de tablas:	x
Índice de figuras:	xi
Índice de anexos:	xiii
Simbología:	xiv
1. Título	16
2. Resumen	17
Abstract	18
3. Introducción	19
4. Marco teórico	21
4.1 Capítulo 1: Generalidades de la energía Fotovoltaica.....	21
4.1.1 Generación de energía fotovoltaica.....	21
4.1.2 Sistemas fotovoltaicos.....	22
4.1.2.1 Efecto fotoeléctrico.....	22
4.1.2.2 Efecto fotovoltaico.....	22
4.1.3 Descripción de los componentes de un sistema fotovoltaico.....	23
4.1.3.1 Módulos fotovoltaicos.....	23
4.1.3.2 Regulador de carga.....	25
4.1.3.3 Acumuladores- Tipos de Baterías.....	25
4.1.4 Eficiencia de los paneles fotovoltaicos.....	25
4.1.5 Factores que afectan el rendimiento de un sistema fotovoltaico.....	27
4.1.5.1 Punto de operación I-V (ajuste de carga para obtener la máxima potencia). 27	
4.1.5.2 Intensidad solar.....	27
4.1.5.3 Temperatura de operación.....	28
4.1.5.4 Ángulo solar.....	28
4.1.6 Efectos del sobrecalentamiento en el rendimiento y la vida útil de los paneles ..	29

4.1.7	Sistemas de enfriamiento de paneles fotovoltaicos.....	30
4.1.7.1	Enfriamiento mediante corriente de aire.....	30
4.1.7.2	Enfriamiento mediante agua.	31
4.1.7.3	Enfriamiento mediante nanofluidos.....	32
4.1.8	Efectos de la temperatura en la eficiencia de los paneles fotovoltaicos.	33
4.2	Capítulo 2: Transferencia de calor	33
4.2.1	Mecanismos de transferencia de calor	33
4.2.1.1	Transferencia de calor por convección	34
4.2.1.2	Transferencia de calor por Radiación.	38
4.3	Capítulo 3: Recurso eólico.....	40
4.3.1	Evaluación del recurso eólico.	41
4.3.2	Información de mediciones del viento en la localidad.....	42
4.3.3	Fuerza de arrastre.....	44
4.4	Capítulo 4: Diseño de sistemas de enfriamiento.....	45
4.4.1	Consideraciones importantes en el diseño de un sistema de enfriamiento superficial para paneles fotovoltaicos.....	45
4.4.2	Componentes de un sistema de enfriamiento mediante aire.....	45
4.4.2.1	Diseño de componentes.	46
4.5	Capítulo 5. Mediciones en paneles fotovoltaicos.....	48
4.5.1	Protocolo de mediciones de temperatura y voltaje de un panel Fotovoltaico.....	48
4.5.2	Normas técnicas utilizadas.....	48
4.5.2.1	IEC-61215.....	48
4.5.3	Métodos de cálculo en función de coeficientes de temperatura de un panel fotovoltaico.....	48
4.5.4	Temperatura de célula en un panel fotovoltaico	49
4.5.4.1	Potencia máxima de generación de un panel solar.	49
4.5.4.2	Cálculo de voltaje de circuito abierto de un panel solar.	49
5.	Metodología.....	50
5.1	Equipos y materiales.....	50
5.1.1	Recursos tecnológicos.....	50
5.1.2	Equipos técnicos	50
5.1.3	Materiales de construcción.....	50
5.2	Procedimiento	51

5.3	Procesamiento y análisis de datos.....	54
5.3.1	Primer Objetivo.....	54
5.3.1.1	Información sobre los elementos principales que influyen en enfriamiento de paneles fotovoltaicos mediante aire.	54
5.3.1.2	Elegir los módulos fotovoltaicos que se utilizarán para el presente estudio. 56	
5.3.1.3	Planteamiento de los parámetros del sistema de enfriamiento.	57
5.3.1.4	Conceptualización del sistema de enfriamiento y diseño de sus componentes.....	66
5.3.2	Segundo Objetivo.....	79
5.3.2.1	Planteamiento de un prototipo de prueba.....	79
5.3.3	Tercer Objetivo	81
5.3.3.1	Evaluación de la eficacia del sistema.....	81
5.3.3.2	Análisis de costos del sistema de enfriamiento construido.....	81
6.	Resultados.....	82
6.1.....	Diseño de elementos del sistema.	82
6.2.....	Construcción de los componentes del sistema.	83
6.3.....	Validación del sistema.	84
7.	Discusión.....	88
8.	Conclusiones.....	90
9.	Recomendaciones	91
10.	Bibliografía	92
11.	Anexos	95

Índice de tablas:

Tabla 1. Promedio mensual de radiación solar	22
Tabla 2. Tipos de células solares.....	24
Tabla 3. Ejemplo de especificaciones de un módulo fotovoltaico.....	26
Tabla 4. Magnitud (G_{rc}) en función del ángulo de inclinación.....	37
Tabla 5. Propiedades de materiales de un panel solar fotovoltaico.	40
Tabla 6. Estaciones meteorológicas en la provincia de Loja.	42
Tabla 7. Velocidad media del viento, estación meteorológica La Argelia.	43
Tabla 8. Temperaturas registradas año 2018 (°C).....	43
Tabla 9. Coeficientes de arrastre en formas típicas.....	44
Tabla 10. Materiales y elementos utilizados en la construcción del sistema.	50
Tabla 11. Factores a considerar para la implementación de un sistema de enfriamiento.	56
Tabla 12. Marcas y modelos de paneles fotovoltaicos.....	56
Tabla 13. Variables para el desarrollo de los factores considerados en el balance de energía del panel solar.	59
Tabla 14. Temperaturas del panel en la cara superior con el sistema de enfriamiento y sin el sistema.....	65
Tabla 15. Variación de Temperaturas de los paneles en función de la Radiación solar.	65
Tabla 16. Componentes del sistema de enfriamiento.....	66
Tabla 17. Relaciones de construcción de sistemas de giro.	69
Tabla 18. Elementos que conforman el sistema de enfriamiento mediante corriente de aire. 79	
Tabla 19. Costos de materiales y construcción del sistema de enfriamiento.	81
Tabla 20. Resultados presentados por día de las mediciones realizadas.....	87
Tabla 21. Potencias máximas calculadas para panel P1 y P2	87

Índice de figuras:

Figura 1. Insolación global anual promedio de la provincia de Loja.....	21
Figura 2. Componentes de un sistema fotovoltaico.....	23
Figura 3. Componentes de un panel solar.....	24
Figura 4. Curva típica I-V de una célula fotovoltaica.....	26
Figura 5. Variación del rendimiento en función de la Irradiación.....	27
Figura 6. Rendimiento-Temperatura.....	28
Figura 7. Especificaciones técnicas de módulo fotovoltaico de 200 W.	30
Figura 8. Enfriamiento de panel fotovoltaico (FV) mediante aire.....	31
Figura 9. Efecto del enfriamiento por agua sobre la temperatura de la celda.....	32
Figura 10. Incremento de la eficiencia por tecnología de refrigeración.	33
Figura 11. Flujos por convección natural de una placa inclinada caliente	35
Figura 12. Factores de absorción, reflexión y transmisión de la radiación incidente por un material semitransparente.	40
Figura 13. Efecto de la fuerza de coriolis sobre la dirección de la circulación del aire.....	41
Figura 14. Velocidad media del viento anual 1982-2010.....	42
Figura 15. Diagrama de cuerpo libre que se muestra una fuerza cortante y un momento flector.....	46
Figura 16. Ejes principales y características geométricas de un rectángulo.....	47
Figura 17. Diagrama de flujo de la metodología de desarrollo del presente trabajo de tesis. 53	
Figura 18. Sistema de enfriamiento de paneles fotovoltaicos mediante intercambiador de calor.....	54
Figura 19. Sistema de enfriamiento por convección natural, forzada con y sin evaporación.55	
Figura 20. Diagrama del balance energético del panel solar fotovoltaico.....	58
Figura 21. Diagrama del proceso de cálculo para obtener la temperatura superficial en el panel fotovoltaico.....	60
Figura 22. Esquema del elemento de distribución de aire.	67
Figura 23. Captador de corriente de aire (diámetro de entrada de 0,35 m).	68
Figura 24. Dimensiones del captador de corriente de aire.....	69
Figura 25. Esquema de momentos en el sistema de giro.....	70
Figura 26. Área proyectada del captador de aire.	71
Figura 27. Diagrama de cargas que intervienen sobre el eje.	73
Figura 28. Diagramas de fuerza cortante y momento flector en los ejes y y z.	75
Figura 29. Esquema de las cargas que intervienen en la placa rectangular.	76

Figura 30. Diagrama de la sección de la placa rectangular, con los ejes x, y, z en dirección positiva.....	76
Figura 31. Ángulo y sección presentes en el diagrama de placa rectangular.	77
Figura 32. Elemento de giro del sistema de enfriamiento.	79
Figura 33. Simulación de la circulación de aire por los ductos del sistema de enfriamiento .	82
Figura 34. Sistema de enfriamiento propuesto realizado en Software.....	83
Figura 35. Sistema de enfriamiento para superficie de panel fotovoltaico construido.....	84
Figura 36. Curvas de temperaturas, mediciones 25 de julio de 2023, Trapichuillo-Catamayo.	84
Figura 37. Curvas de voltaje, mediciones 25 de julio de 2023.	85
Figura 38. Curvas de temperaturas, mediciones 26 de julio de 2023, Electricista Alto - Loja.	85
Figura 39. Curvas de voltaje, mediciones 26 de julio de 2023, Electricista Alto – Loja.....	85
Figura 40. Curvas de temperaturas, mediciones 29 de julio de 2023, Trapichuillo-Catamayo	86
Figura 41. Curvas de voltaje, mediciones 29 de julio de 2023.	86
Figura 42. Curva de temperaturas, mediciones 01 de septiembre del 2023.	86
Figura 43. Curvas de velocidades del viento a la entrada y salida del sistema de enfriamiento.	87

Índice de anexos:

Anexo 1. Criterios de evaluación para selección de paneles solares de estudio.....	95
Anexo 2. Tabla de valores de mediciones realizadas, de temperaturas del panel placa inferior, placa superior y temperatura ambiente.	97
Anexo 3. Especificaciones técnicas del panel solar.....	98
Anexo 4. Propiedades del aire a diferentes temperaturas.	100
Anexo 5. Simulaciones de corriente de aire mediante Software.	101
Anexo 6. Mediciones de velocidades a la entrada y salida del captador de corriente de aire.	102
Anexo 7. Dimensiones y masa de la lámina galvanizada y ángulo de acero.....	103
Anexo 8. Costos totales del sistema de enfriamiento mediante corriente de aire.....	104
Anexo 9. Propiedades físicas del material del eje que une la veleta-captador.	105
Anexo 10. Ficha técnica de pletinas.	106
Anexo 11. Factor de seguridad para diseño de piezas mecánicas.	107
Anexo 12. Especificaciones material del material de placa rectangular de la veleta.	108
Anexo 13. Tablas de mediciones realizadas para la validación del sistema de enfriamiento mediante corriente de aire.....	109
Anexo 14. Cálculos de potencias, temperatura de celda teórica, y porcentaje de error entre la temperatura medida y calculada.....	113
Anexo 15. Fotografías, mediciones realizadas.	115
Anexo 16. Certificación de traducción del resumen.....	116
Anexo 17. Planos del sistema de enfriamiento.....	116

Simbología:

β_{op} = Ángulo óptimo de inclinación.

ϕ = Latitud de un lugar específico.

\dot{q}_{cv} = Flujo de calor por convección [W/m²].

\dot{q}_{rad} = Flujo de calor por radiación [W/m²].

\dot{h} = Coeficiente de transferencia de calor por convección [W/ m² · °C].

A_s = Área de la superficie del panel solar [m²].

T_s = Temperatura de la superficie del panel solar [K].

T_∞ = Temperatura ambiente [K].

T_f = Temperatura del fluido [°C].

h_n = Coeficiente de transferencia de calor natural [W/ m² · °C].

h_f = Coeficiente de transferencia de calor forzado [W/ m² · °C].

ε = Emisividad.

V_{mp} = Voltaje de potencia máxima [V].

I_{mp} = Corriente de potencia máxima [A].

η = Eficiencia del panel solar.

V_{oc} = Voltaje de circuito abierto [V].

I_{sc} = Corriente de circuito abierto [A].

ν_f = Viscosidad cinemática del fluido [m²/ s].

k_f = Conductividad térmica del fluido [W/m· K].

Pr = Número de Prandtl.

α_f = Difusividad térmica del fluido [m²/ s²].

Nu = Número de Nusselt.

Gr_a = Número de Grashof.

Re = Numero de Reynolds.

P = Potencia eléctrica [W].

G_{abs} = Radiación solar absorbida por el panel solar [W].

Q_s = Caudal de aire a la salida del ducto [m³/s].

Q_e = Caudal de aire a la entrada del ducto [m³/s].

D_e = Diámetro de entrada [m].

D_s = Diámetro de salida [m].

d = Distancia [m].

F = Fuerza [N].

Cd = Coeficiente de resistencia [Adimensional].

M_y = Momentos en eje Y [N. m].

1. Título

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO
SUPERFICIAL DE PANELES FOTOVOLTAICOS MEDIANTE CORRIENTE DE
AIRE**

2. Resumen

En el presente trabajo se muestra el diseño y construcción de un sistema de enfriamiento superficial para paneles fotovoltaicos mediante corriente de aire como una alternativa para reducir la temperatura de funcionamiento y con ello mejorar el voltaje y eficiencia de operación. La investigación consistió en realizar un análisis comparativo entre dos paneles solares de potencia 50 W, bajo las mismas condiciones de funcionamiento y características técnicas similares, para de esta manera evaluar la eficacia del sistema. Se identificó los criterios de funcionamiento del sistema considerando tres aspectos que son: el balance energético de uno de los paneles fotovoltaicos de estudio considerando los datos de la ficha técnica del mismo; la búsqueda de información bibliográfica acerca de las tecnologías de refrigeración aplicadas a estos sistemas y con base en a la información meteorológica del lugar de estudio. La construcción del sistema de enfriamiento se realiza en función de los cálculos previos de diseño de los diversos mecanismos, partes y piezas, los elementos normalizados utilizados se eligieron en función de la resistencia de los materiales, disponibilidad y costos. La validación del prototipo se realizó mediante un análisis de mediciones y monitoreo de temperaturas superficiales, voltaje de circuito abierto, velocidad del viento de entrada y salida del sistema, y la radiación, de esta manera se obtiene las potencias máximas de generación para cada panel, su validación se concretó con los cálculos de la temperatura de celda solar teórica aplicando el método de Mattei, cuyo error relativo es de 4,74% de los datos medidos en relación a los datos calculados.

Palabras claves: fotovoltaicos, refrigeración, temperaturas, radiación, potencias,

Abstract.

The present work shows the design and construction of a surface cooling system for photovoltaic panels through air current as one alternative to reduce the functioning temperature and thus improve the voltage and operating efficiency. The research consisted of making a comparative analysis between two solar panels with the same technical characteristics and under the same functioning conditions to evaluate the system's efficiency. Three aspects were considered to identify the operating criteria of the system: the energy balance of one of the photovoltaic panels under study based on the data of its technical data sheet; the search for bibliographic information about the cooling technologies applied to these systems and based on the meteorological information of the study site. The construction of the cooling system is carried out based on previous design calculations of the various mechanisms, parts and pieces; the standardized elements used were chosen based on the strength of the materials, availability and costs. The validation of the prototype is done through an analysis of measurements and monitoring of surface temperatures, open circuit voltage, wind speed input and output of the system, and radiation, in this way it obtains the maximum generation powers for each panel, its validation is realized with the calculations of the theoretical solar cell temperature by applying the Mattei method, whose relative error is 4,74% of the measured data in relation to the calculated data

Keywords: *photovoltaics, cooling, temperatures, radiation, power, efficiency.*

3. Introducción

El uso de energía fotovoltaica ha experimentado un crecimiento significativo a nivel mundial. Según el informe de la Agencia Internacional de Energía Renovable IRENA (2021), la capacidad global de generación de energía fotovoltaica alcanzó los 773 GW, un incremento importante en comparación con los 7,7 GW registrados en 2007. Este rápido crecimiento refleja el reconocimiento y la adopción de la energía fotovoltaica como una fuente limpia, abundante y económicamente viable.

No obstante, el aumento de la eficiencia y capacidad de los paneles fotovoltaicos ha generado un desafío crucial que es el sobrecalentamiento. El exceso de calor reduce el rendimiento y la vida útil de los paneles, lo cual puede afectar la viabilidad y rentabilidad de los sistemas fotovoltaicos. Por lo tanto, es necesario contar con soluciones innovadoras que aborden eficazmente este problema y optimicen el rendimiento de la energía solar fotovoltaica.

Con base en estudios previos sobre sistemas de enfriamiento para paneles fotovoltaicos, se ha reconocido la importancia y el potencial de utilizar tecnología de refrigeración y se han obtenido los siguientes resultados: Agua-aire aumenta la eficiencia un 21,85%, nano-fluidos 21,1%, agua 17,72%, aire 16,45%, tubos de calor 14,63% y materiales de cambio de fase (PCM) por sus siglas en inglés 8,92% (Linares, 2020).

Por lo descrito anteriormente nace la idea del presente proyecto de investigación, el prototipo propuesto está conformado por un sistema de captación de corriente de aire con orientación automática en dirección del flujo del viento, similar a un aerogenerador con cola. El funcionamiento consiste en captar la corriente de aire, dirigirla a través de un ducto hacia la superficie del panel y mediante esta corriente de aire reducir su temperatura. El área de captación del sistema es 0,385 m² y tiene un alcance máximo en el aumento de la velocidad del viento del 88%, permitiendo así una disminución promedio de temperatura de 4,34 °C en la superficie del panel de estudio.

El objetivo general de esta investigación es “Diseñar y construir un sistema de enfriamiento superficial de paneles fotovoltaicos mediante la captación de corrientes de aire”. Los objetivos específicos son los siguientes:

- ✓ Diseñar un prototipo para aprovechar corrientes de aire y utilizarlo como sistema de enfriamiento superficial de paneles fotovoltaicos.
- ✓ Construir el prototipo del sistema de enfriamiento diseñado.
- ✓ Evaluar la eficacia del sistema de enfriamiento.

Con la ejecución de este proyecto, se demuestra que es posible implementar soluciones alternativas para el enfriamiento de paneles solares, sin el uso de la energía del propio sistema mejorando así la eficiencia global del mismo.

Para la ejecución de la presente investigación en la primera sección se presenta el Marco Teórico, donde se aborda las generalidades de la energía fotovoltaica, los efectos del sobrecalentamiento en el rendimiento y la vida útil de los paneles fotovoltaicos, diseño de sistemas de enfriamiento y fundamentos de transferencia de calor, diseño mecánico, recurso eólico entre otros.

En la sección de metodología se aborda el procedimiento para el cumplimiento de cada objetivo planteado, se identifica los procedimientos para el diseño de cada componente del sistema de enfriamiento con base en los parámetros de funcionamiento establecidos.

En el apartado de resultados se justifica los procedimientos indicados, en esta sección se presenta el sistema de enfriamiento realizado en software CAD, posteriormente su construcción y ensamblaje de los componentes. Adicionalmente se presentan resultados de la valoración del sistema de enfriamiento, con gráficas indicando las variaciones de temperaturas alcanzadas.

Finalmente se muestran las conclusiones y algunas recomendaciones para mejorar el sistema de enfriamiento propuesto.

4. Marco teórico

4.1 Capítulo 1: Generalidades de la energía Fotovoltaica

4.1.1 Generación de energía fotovoltaica

Es una forma de energía renovable que se genera a partir de la conversión directa de la radiación solar en electricidad. Este proceso se logra mediante el uso de dispositivos conocidos como células fotovoltaicas, que están fabricados con materiales semiconductores como el silicio. En los últimos años la energía solar fotovoltaica está alcanzando relevancia en el ámbito de la transición energética a nivel global.

Según la Agencia Internacional de Energías Renovables, (2022) la potencia instalada para generación de energía fotovoltaica crece constantemente a nivel mundial en relación a otras energías alternativas, en equipos y centrales de generación de energía fotovoltaica alcanzando un 22% en el año 2022, superando ampliamente el aumento interanual de instalaciones de energía eólica, la misma que alcanzó un crecimiento del 9% para el mismo año.

En Ecuador, el ex Consejo Nacional de Electricidad CONELEC (2008) desarrolló el Atlas Solar para generar electricidad a partir de la energía solar. La **Figura 1**, muestra las zonas con mayor insolación en el país, destacando la provincia de Loja, que es una de las tres provincias después de Imbabura y Carchi con mayor potencial para generación fotovoltaica. El potencial solar estimado en el país es de 312 GW, equivalente a 456 TWh por año o 283 MBEP por año. A pesar del alto potencial, el desarrollo de la energía solar fotovoltaica en Ecuador es incipiente, especialmente en micro generación distribuida, con una capacidad efectiva de solo 28.6 MW hasta el año 2022, parte de esta capacidad instalada se encuentra en la provincia de Loja, la cual cuenta con los rangos más elevados de insolación global a nivel de todo el país.

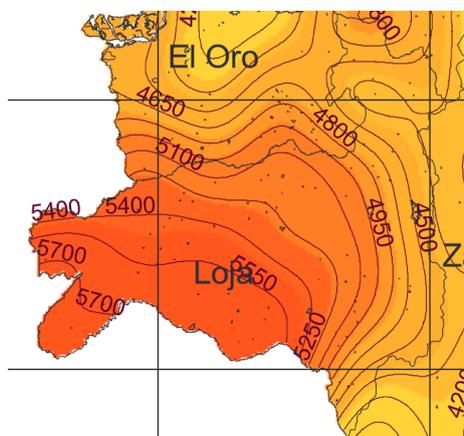


Figura 1. Insolación global anual promedio de la provincia de Loja.
Fuente: CONELEC (2008).

De manera específica en la ciudad de Loja, Vallejo & Salazar (2011) obtuvieron datos monitoreados de los promedios diarios de radiación solar correspondientes a 3 meses consecutivos, obteniendo como promedio máximo de radiación 539,13 W/m² como se muestra en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Promedio mensual de radiación solar

MES	DICIEMBRE 2010	ENERO 2011	FEBRERO 2011
Radiación W/m²	470,68	539,13	485,35

Fuente: Vallejo & Salazar (2011).

4.1.2 Sistemas fotovoltaicos

4.1.2.1 Efecto fotoeléctrico.

Es un fenómeno en el cual los electrones son liberados de la superficie de un material cuando este es expuesto a la luz visible o ultravioleta, sin necesidad de que ocurra algún efecto mecánico. Este fenómeno fue descubierto por Edmund Becquerel en 1839 y posteriormente investigado experimentalmente por Heinrich Hertz en 1887. Sin embargo, el efecto fotoeléctrico o fotovoltaico se mantuvo como un misterio para los científicos hasta que Albert Einstein proporcionó una explicación en 1905, basando su formulación de la fotoelectricidad en una extensión del trabajo sobre los cuantos de Max Planck (Martínez, 2010).

4.1.2.2 Efecto fotovoltaico.

El efecto fotovoltaico es un fenómeno físico que ocurre en materiales semiconductores y permite la conversión directa de la energía lumínica en energía eléctrica. Se produce en una estructura llamada célula fotovoltaica o panel solar, que consta de varias capas de materiales semiconductores.

Materiales semiconductores: La mayoría de las células fotovoltaicas están hechas de silicio, un material semiconductor ampliamente disponible y eficiente para la conversión fotovoltaica. El silicio utilizado en las células fotovoltaicas es dopado intencionalmente para crear dos regiones: una región tipo p con exceso de cargas positivas y una región tipo n con exceso de cargas negativas. La interfaz entre estas dos regiones se llama una unión p-n.

Excitación por la luz: Cuando la luz solar incide en la superficie de la célula fotovoltaica, los fotones (partículas de luz) transportan energía. Si la energía de los fotones es suficiente, pueden ser absorbidos por los electrones del material semiconductor. Esto hace que los electrones se liberen de sus átomos de origen y creen pares electrón-hueco en la región de la unión p-n.

Generación de corriente eléctrica: Los electrones liberados en la región tipo n y los huecos generados en la región tipo p se mueven hacia sus respectivas regiones cargadas opuestamente debido al campo eléctrico existente en la unión p-n. Este movimiento crea una diferencia de potencial, generando una corriente eléctrica.

Contactos metálicos: Para recolectar y utilizar la corriente generada, se colocan contactos metálicos en las regiones tipo n y tipo p de la célula fotovoltaica. Estos contactos permiten el flujo de electrones fuera de la célula hacia un circuito externo, donde se puede utilizar como energía eléctrica.

Uso de la energía eléctrica: La corriente eléctrica generada por la célula fotovoltaica puede ser utilizada directamente para alimentar dispositivos eléctricos o almacenada en baterías para su uso posterior (Flores et al., 2014).

4.1.3 Descripción de los componentes de un sistema fotovoltaico

Una instalación solar fotovoltaica está conformada por algunos elementos; módulos fotovoltaicos, regulador de carga, inversor y en los casos de sistemas autónomos están incluidas baterías para el almacenamiento de energía.

En la **Figura 2** se puede apreciar un esquema donde están incluidos todos los componentes necesarios de una instalación fotovoltaica.

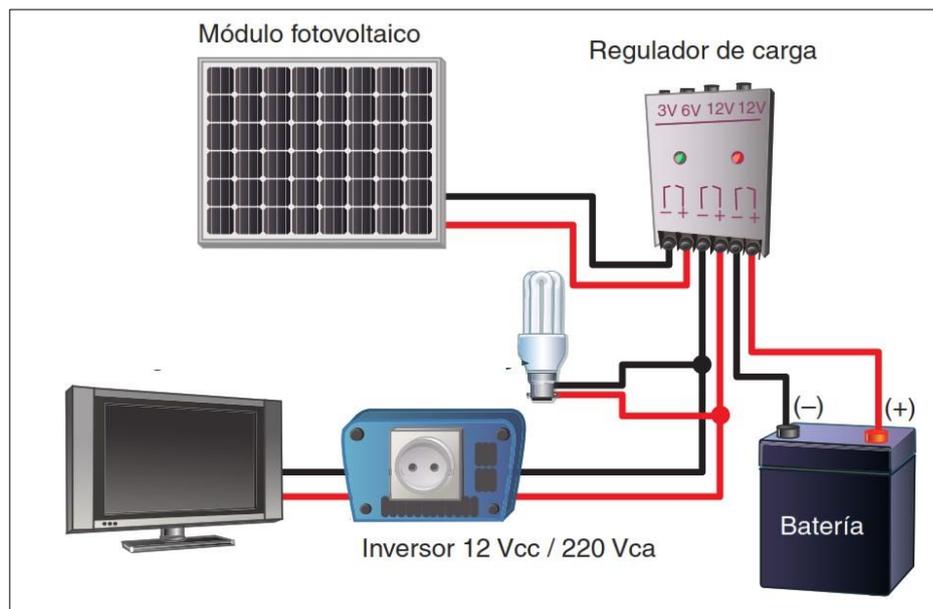


Figura 2. Componentes de un sistema fotovoltaico

Fuente: Foster, Ghassemi, Alma Cota, Vaughn, (2011).

4.1.3.1 Módulos fotovoltaicos.

Antes de referirnos al panel solar o módulo fotovoltaico es importante conocer acerca de las células solares, cuya función principal es convertir directamente en electricidad los

fotones provenientes de la luz del sol, su funcionamiento se basa en el efecto fotovoltaico descrito en la sección anterior. Al conjunto de células, conectadas eléctricamente, encapsuladas y montadas sobre una estructura de soporte o marco se denomina panel solar.

Proporciona en su salida de conexión una tensión continua y se diseña para valores concretos de tensión de 6 V, 12 V, 24 V, etc. que definirán la tensión a la cual va a trabajar el sistema fotovoltaico. En la **Figura 3** se observa un esquema típico de la construcción de un panel solar, así como sus características principales (NAP, 2007).

Cabe destacar que los paneles fotovoltaicos se caracterizan por tener niveles elevados de absorptividad de la radiación solar estos valores pueden estar enmarcadas entre 0,92 y 0,94 (Garrido, 2020).

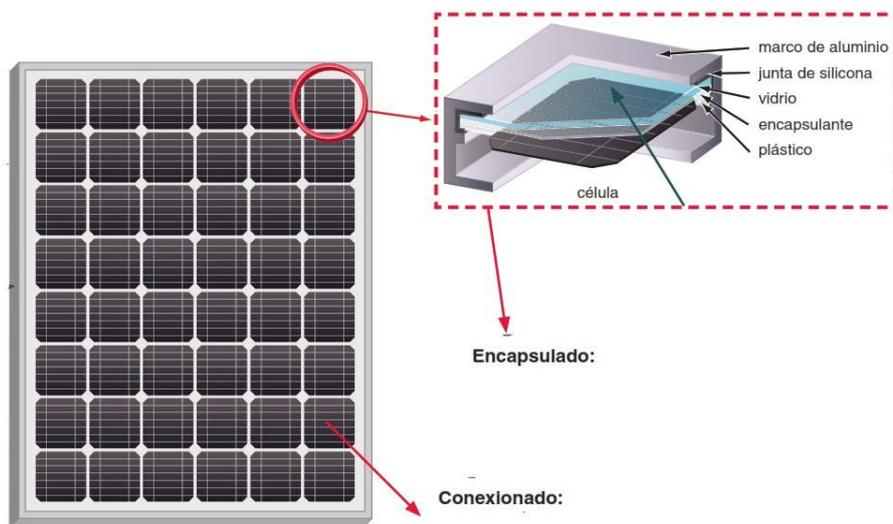


Figura 3. Componentes de un panel solar.

Fuente: NAP (2007).

Los tipos de paneles fotovoltaicos, vienen dados por la tecnología de fabricación de las células y son:

Silicio cristalino, (monocristalino y multi-cristalino).

Silicio Amorfo.

En la **Tabla 2** se describe las diferencias de cada tipo de célula, así como su rendimiento, características y fabricación.

Tabla 2. Tipos de células solares.

Células	Silicio	Rendimiento laboratorio	Rendimiento directo	Características	Fabricación
	Monocristalino	24 %	15-18 %	Suelen tener un color azul homogéneo y están compuestos por células individuales que se	Se obtiene de silicio puro y dopado con boro

				conectan entre sí. (Czochralski)	
	Policristalino	19-20 %	12-14 %	La superficie está compuesta por cristales y contiene diferentes tonalidades azules	El número de fases de cristalización es menor que el del monocristalino
	Amorfo	16 %	< 10 %	No existe conexión visible entre células, su color homogéneo es marrón.	Puede depositarse en forma de lámina delgada sobre un sustrato como vidrio o plástico.

Fuente: Perpiñán Lamigueiro et al., (2012).

4.1.3.2 Regulador de carga.

Para el correcto funcionamiento del sistema es necesario instalar un regulador de carga en la unión entre los paneles solares y las baterías, cumpliendo dos funciones importantes. La primera es evitar situaciones de carga, garantizando una carga suficiente al acumulador evitando una sobrecarga del mismo y la segunda función de sobre descarga de la batería, este evita que el acumulador o batería tenga una descarga excesiva, funciones que contribuyen en alargar la vida útil de los acumuladores (NAP, 2007).

4.1.3.3 Acumuladores- Tipos de Baterías.

La entrada de la energía solar hacia los módulos fotovoltaicos no es uniforme, si bien algunos de los factores que influyen pueden ser predecibles como la duración de la noche o estaciones del año, existen otros factores impredecibles como la nubosidad en un instante determinado. Las variaciones de incidencia de la luz solar, consecuentemente disminuyen la generación de energía eléctrica del sistema. Esto hace necesario la utilización de baterías para que el sistema funcione normalmente en los valores diseñados durante los momentos donde la radiación solar no es suficiente para generar la energía requerida para el normal funcionamiento del sistema.

Las baterías cumplen tres funciones importantes en un sistema fotovoltaico: almacenar energía durante un periodo determinado de tiempo, proporcionar una potencia instantánea elevada y fijar la tensión de trabajo de la instalación.

Uno de los parámetros más importantes a considerar en el momento de elegir un acumulador es su capacidad, la cual se define como la cantidad de energía eléctrica que puede almacenar y suministrar en un ciclo de carga y descarga. Se mide en amperios hora (Ah).

4.1.4 Eficiencia de los paneles fotovoltaicos

El rendimiento de un módulo se determina por las características de corriente-voltaje, a partir de las especificaciones técnicas del módulo fotovoltaico proporcionados por los fabricantes,

por ejemplo, en la **Tabla 3** el circuito abierto, sin corriente, proporciona el máximo voltaje de 18,7 V, y un cortocircuito, sin voltaje, proporciona la corriente máxima, para este caso de 3,5 A. Se sabe que la potencia es voltaje multiplicado por corriente, y la máxima eficiencia se encuentra en el punto de inflexión de la curva, esto se puede comprender de mejor manera al observar la **Figura 4**.

Tabla 3. Ejemplo de especificaciones de un módulo fotovoltaico.

DESCRIPCIÓN	VALOR
Potencia pico (Wp)	503 W
Voltaje de circuito abierto (Voc)	17,2 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	3,5 A
Voltaje en potencia máxima (Vmp)	18,7 V
Corriente en potencia máxima (Imp)	2,68 A
Standard Test Conditions (STC)	1000W/m ² , 25 °C

Fuente: Foster, Ghassemi, Alma Cota, Vaughn, (2011).

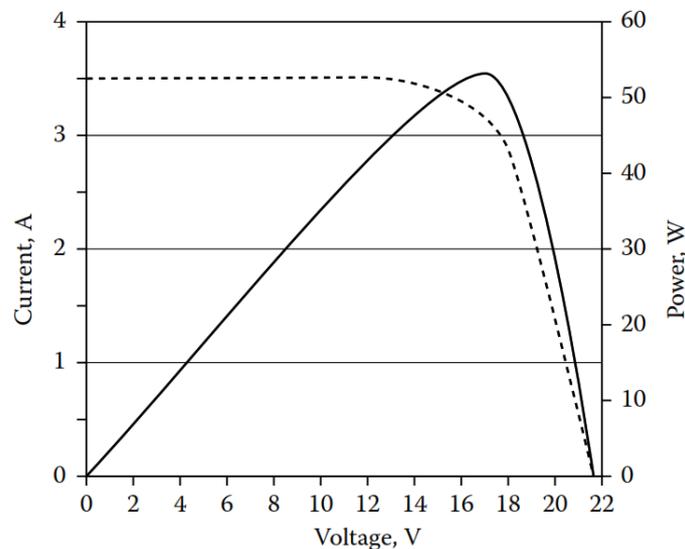


Figura 4. Curva típica I-V de una célula fotovoltaica.

Fuente: Foster, Ghassemi, Alma Cota, Vaughn, (2011).

Algunas especificaciones de las células fotovoltaicas proporcionan curvas de potencia a 1 y 0,5 para energía incidente de 1000 W/m² y 500 W/m², lo que representa el rendimiento en condiciones de pleno sol y días nublados respectivamente (Foster et al., 2011).

Sin embargo, las curvas de potencia cambian con la temperatura, y la potencia de salida máxima disminuye, así también se puede ver afectada por otras variables.

La eficiencia de una celda solar (η), se define como el porcentaje de potencia convertida en energía eléctrica de la luz solar total absorbida por un panel, cuando una celda solar está

conectada a un circuito eléctrico. En la Ecuación (2) , se calcula usando la relación del punto de potencia máxima, dividido entre la luz que llega a la celda, irradiancia (G, en W/m²), bajo condiciones estándar (STC) y el área superficial de la celda solar (Herrera, 2013).

$$\eta = \frac{\text{Potencia máxima electricia}}{\text{Potencia solar incidente}} \quad (1)$$

4.1.5 Factores que afectan el rendimiento de un sistema fotovoltaico

Existen cuatro factores que afectan el rendimiento del sistema, descritos a continuación.

4.1.5.1 Punto de operación I-V (ajuste de carga para obtener la máxima potencia).

El punto de operación I-V se refiere al ajuste de carga necesario para obtener la máxima potencia de un sistema fotovoltaico. Esto implica encontrar el equilibrio adecuado entre la corriente y el voltaje para maximizar la eficiencia energética. Al ajustar la carga, se busca encontrar el punto óptimo en la curva I-V donde se obtenga la máxima potencia de salida.

4.1.5.2 Intensidad solar.

La intensidad solar hace referencia a la cantidad de radiación solar incidente que llega al sistema fotovoltaico. Esta radiación solar proporciona la energía necesaria para generar electricidad a través de las células solares. Esta puede variar según las condiciones climáticas, la ubicación geográfica y la hora del día. Una mayor intensidad solar resulta en una mayor generación de energía, en la **Figura 5** se muestra cómo afecta el rendimiento de un panel fotovoltaico en función de la Intensidad solar.

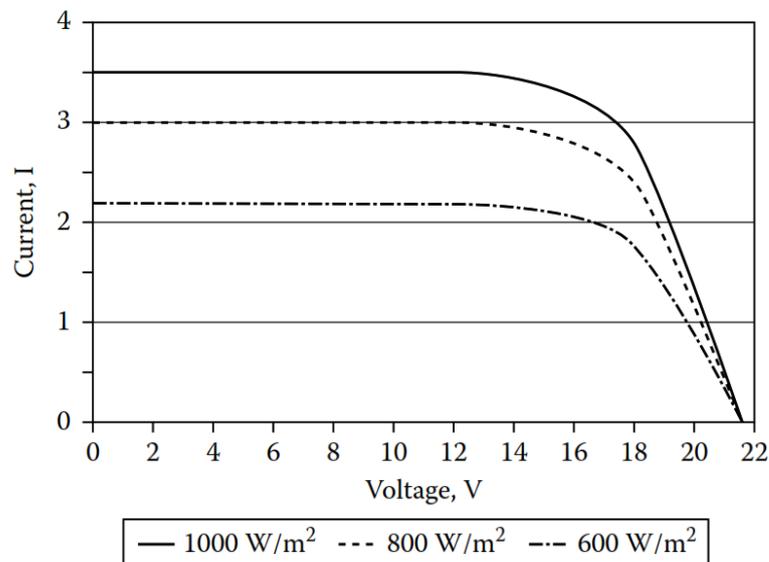


Figura 5. Variación del rendimiento en función de la Irradiación.

Fuente: Foster, Ghassemi, Alma Cota, Vaughn, (2011).

4.1.5.3 Temperatura de operación.

Este factor hace referencia a la temperatura ambiente en la que se encuentra el sistema fotovoltaico. Las células solares son sensibles a los cambios de temperatura y su rendimiento puede verse afectado. Generalmente, las células solares tienen una disminución en su eficiencia a medida que aumenta la temperatura. Por lo tanto, es importante controlar y gestionar la temperatura de operación para maximizar el rendimiento del sistema. En la **Figura 6** se aprecia las curvas del rendimiento en función de la temperatura del panel fotovoltaico.

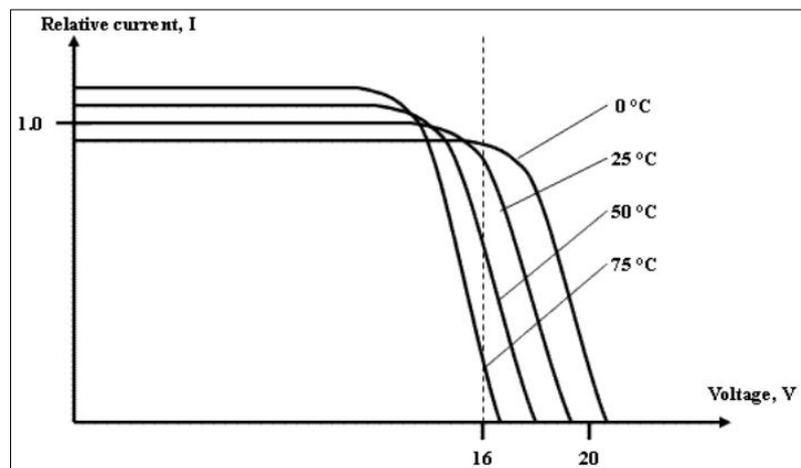


Figura 6. Rendimiento-Temperatura.

Fuente: Foster, Ghassemi, Alma Cota, Vaughn, (2011).

4.1.5.4 Ángulo solar.

El ángulo de incidencia de los rayos solares sobre las células solares puede variar a lo largo del día y del año debido a la rotación de la Tierra y la inclinación del eje terrestre. El ángulo solar óptimo depende de la ubicación geográfica y las estaciones del año. Un ángulo adecuado de incidencia solar permite una mayor captación de energía solar y, por lo tanto, un mayor rendimiento del sistema fotovoltaico.

La orientación óptima de los paneles solares depende de la ubicación geográfica de la instalación y del tipo de sistema solar que se está utilizando. En general, se recomienda orientar los paneles solares hacia el sur (en el hemisferio norte) o hacia el norte (en el hemisferio sur) para maximizar la captación de energía solar. Para calcular la inclinación de los paneles fotovoltaicos se puede obtener aplicando la **Ecuación** (2), donde ϕ es la latitud del lugar donde se realizará la instalación (Perpiñán Lamigueiro et al., 2012).

$$\beta_{op} = 3,7 + 0,69 \times |\phi| \quad (2)$$

Para cualquier casa los fabricantes recomiendan no se encuentre por debajo de los 15°, esto se debe a que, en ángulos muy bajos, puede acumularse suciedad, polvo y otros materiales en la

superficie de los paneles solares, lo que puede afectar negativamente su rendimiento y eficiencia. Al inclinar los paneles solares a partir de los 15 grados, se permite que la lluvia y la gravedad ayuden a limpiar la superficie de los paneles de manera más efectiva.

4.1.6 Efectos del sobrecalentamiento en el rendimiento y la vida útil de los paneles

El sobrecalentamiento de los paneles fotovoltaicos, afecta de manera directa en su rendimiento, la potencia de las células disminuye en un 0,5% por cada grado de aumento en su temperatura, convirtiéndose este efecto en una causa importante de la disminución de la producción ideal, es decir se produce una reducción de potencia aproximada del 5% por cada aumento de 10 °C en su temperatura de operación. Durante la operación, es común que la temperatura supere los 25 °C de las condiciones de prueba estándar denominadas (STC) por sus siglas en inglés. Es importante tener en cuenta que este porcentaje puede variar ligeramente según la tecnología utilizada por el fabricante de las células.

Según se analiza en la sección correspondiente al funcionamiento de los paneles fotovoltaicos, la temperatura de operación de los módulos depende tanto de factores ambientales, como la radiación solar, la temperatura ambiente y la velocidad del viento, como de otros factores relacionados con su ubicación, como la posición de los módulos y las condiciones de ventilación en la parte posterior.

Por lo tanto, si comparamos dos ubicaciones con las mismas condiciones de radiación solar incidente, en aquella con un clima más frío se generará más energía para un mismo sistema fotovoltaico (NAP, 2007).

Explicado en otros términos el incremento de temperatura en las células tiene un efecto dual: aumenta la corriente, pero, al mismo tiempo, provoca una disminución mucho mayor en la tensión, en proporción. Esto implica que tanto la corriente de cortocircuito como el voltaje a circuito abierto se ven afectados por la temperatura de trabajo, pero presentan variaciones diferentes en términos de tipo y magnitud porcentual.

Si tomamos como punto de referencia los valores a 25 °C, la corriente de cortocircuito aumenta de manera moderada (+1,6% a 50 °C; +3,3% a 75 °C), mientras que el voltaje a circuito abierto disminuye de forma significativa (alrededor del 8% a 50 °C, pero cerca de un 15% a 75 °C). Debido a esto, los fabricantes se esfuerzan por ofrecer un voltaje de circuito abierto elevado a 25 °C, para que el aumento de temperatura de trabajo no afecte negativamente el proceso de carga de las baterías, en la **Figura 7** se puede apreciar las especificaciones de un módulo fotovoltaico, entre ellas se detalla el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) de 22,97 V. Cuando la temperatura de trabajo es menor a 25 °C, el voltaje de circuito abierto aumenta y la corriente de cortocircuito disminuye (Blas Martínez & Ángel Torres, 2011).

WAAREE One with the Sun		MADE IN INDIA www.waaree.com (An ISO 9001,14001 & OHSAS certified company)	
WS - 200			
Maximum Power (Pmax)	200.0 W	Certified With  IEC 61215 IEC 61730 - 1 IEC 61730 - 2 IEC 61761 Intertek, UL	
Open Circuit Voltage (Voc)	22.97 V		
Short Circuit Current (Isc)	11.64 A		
Maximum Power Voltage(Vmp)	17.97 V		
Maximum Power Current(Imp)	11.13 A		
Maximum System Voltage	1000 V DC		
Weight	17.5 Kg		
Dimension	1490 x 990 mm		
All Values measured at STC : 25°C Cell temp, 1000 W/m ² , AM 1.5			
 WARNING - ELECTRICAL HAZARD The Unit Produces Electricity When Exposed To Light. Cover The Glass With An Opaque Material, Before Opening Terminal Box. Don't Disconnect The Plugs Under Load.			
WAAREE ENERGIES LIMITED Plot No. 231-236; Surat Special Economic Zone, Diamond Park, Sachin, Surat-394230, Gujarat, INDIA.		Contact Details customercare@waaree.com Toll Free - 1800 212 1321 +91 90999 26499	

Figura 7. Especificaciones técnicas de módulo fotovoltaico de 200 W.

Fuente: Waaree Energies Ltd (2014).

El efecto global de estos cambios es una disminución en la potencia del panel a medida que aumenta la temperatura de trabajo del mismo.

4.1.7 Sistemas de enfriamiento de paneles fotovoltaicos

Con base en la descripción de la sección anterior acerca de las afectaciones en el rendimiento de los paneles fotovoltaicos, es un desafío identificar tecnologías de enfriamiento de estos sistemas. La transferencia de calor en los paneles solares fotovoltaicos se da por los mecanismos de conducción, convección y radiación, los cuales se describirán en el siguiente capítulo.

Algunas experimentaciones desarrolladas con la finalidad de mejorar los parámetros eléctricos de un panel fotovoltaico mediante el uso de un flujo de aire inducido o forzado (para instalaciones sobre techo), para el caso de convección natural, el espacio de aire en el canal de enfriamiento debajo del módulo fotovoltaico debe ser lo suficientemente amplio para permitir las corrientes de aire natural necesarias ingresen para enfriar el módulo fotovoltaico, con esto el enfriamiento por convección natural y forzada aumentó la potencia pico del módulo en un 7,5% y un 15%, respectivamente (Mazón-Hernández et al., 2013).

Para maximizar la transferencia mediante los mecanismos mencionados es necesario aplicar tecnologías de refrigeración, se utilizan para reducir la temperatura del panel y mejorar su eficiencia.

4.1.7.1 Enfriamiento mediante corriente de aire.

La refrigeración mediante circulación de aire es una de las técnicas de enfriamiento más simples y ampliamente disponibles. Durante este proceso, se utiliza convección natural o

forzada para extraer el calor de los sistemas fotovoltaicos/térmicos. Sin embargo, el uso de circulación de aire forzado implica un método de enfriamiento activo que requiere la energía de un ventilador, lo cual se ha señalado como una desventaja, y como consecuencias reduciendo drásticamente la eficiencia del sistema, se considera una opción económica debido a que requiere poco o ningún material adicional. En la **Figura 8** se puede ver el esquema de un panel fotovoltaico aplicando enfriamiento mediante corriente de aire (Linares, 2022).

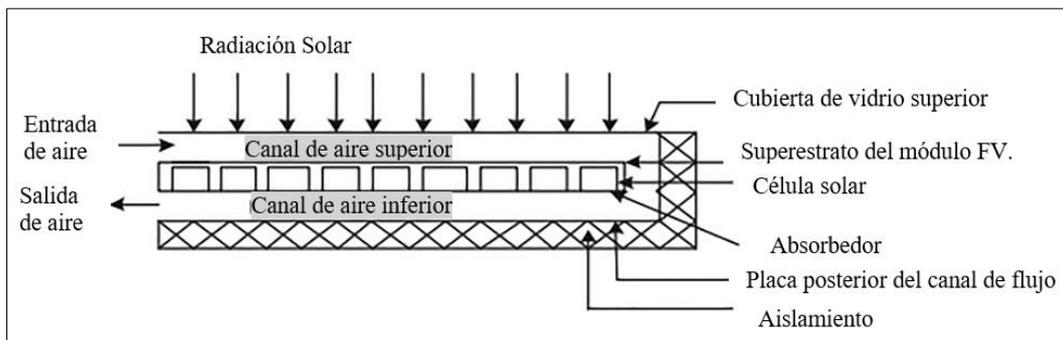


Figura 8. Enfriamiento de panel fotovoltaico (FV) mediante aire.

Fuente: Kumar & Rossen (2011).

Los resultados presentados en este estudio se compararon con módulos fotovoltaicos sin refrigeración. Con base en la comparación, se demostró que el uso de la técnica de refrigeración por aire dio como resultado un 7,2% y un 6% más de energía eléctrica (Maleki et al., 2020).

4.1.7.2 Enfriamiento mediante agua.

La convección forzada inducida por el flujo de líquido dentro de los canales insertados en la parte posterior de los módulos fotovoltaicos, es otra forma eficiente de enfriarlos, esto se puede afirmar gracias a estudio comparativo de técnicas de enfriamiento para módulos PV con reflectores en condiciones climáticas de Egipto (Maleki et al., 2020).

En el estudio se consideraron tres técnicas de enfriamiento diferentes: convección de aire forzado, enfriamiento por agua y combinación de convección de aire forzado/enfriamiento por agua. Los resultados experimentales mostraron que el enfriamiento por agua fue la mejor opción de enfriamiento para los módulos fotovoltaicos en condiciones climáticas de Egipto. Según los resultados, el uso de enfriamiento activo por agua para los módulos PV puede reducir la temperatura del módulo en aproximadamente un 20%, lo que se traduce en un aumento de eficiencia de aproximadamente un 9%. Además de la mejora en la eficiencia de generación eléctrica (Maleki et al., 2020). En la **Figura 9**, se aprecia los resultados obtenidos del estudio antes mencionado.

Se destaca como ventaja de la aplicación de esta tecnología de enfriamiento en paneles solares las posibilidades de utilizar el calor extraído para diversos fines, lo que significa un aumento en la energía recolectada.

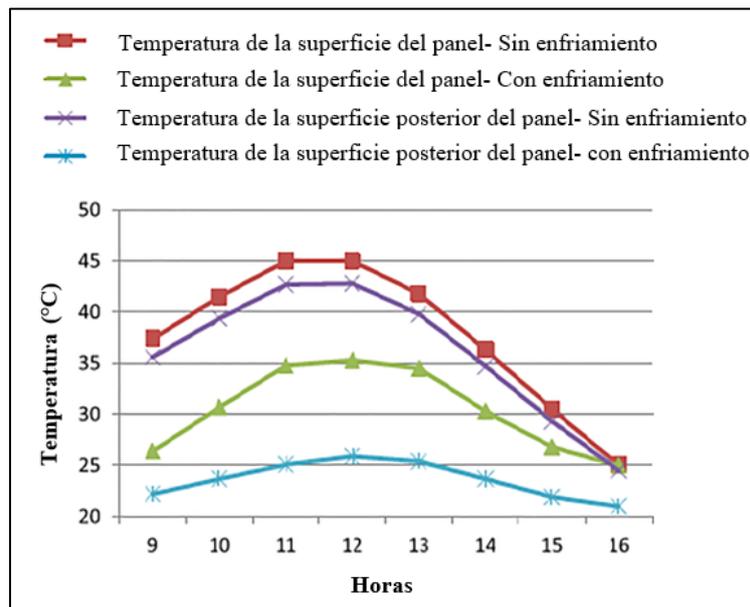


Figura 9. Efecto del enfriamiento por agua sobre la temperatura de la celda.

Fuente: (Bahaidarah et al., 2013).

4.1.7.3 Enfriamiento mediante nanofluidos.

Se han llevado a cabo investigaciones teóricas y experimentales para mejorar el rendimiento de los sistemas solares fotovoltaicos. La mejor forma de mejorar la eficiencia de una instalación solar fotovoltaica es con la utilización de nanofluido. La conductividad térmica del nanofluido es mayor en comparación con otros fluidos, lo que aumenta la tasa de transferencia de calor y, en última instancia, la eficiencia.

Con la aplicación de enfriamiento de paneles fotovoltaicos mediante nanofluidos es posible reducir la temperatura de operación del sistema fotovoltaico térmico en hasta un 30% mejorando la eficiencia energética total del sistema fotovoltaico (Gupta & Pradhan, 2021).

Adicionalmente existen estudios de enfriamiento de módulos fotovoltaicos mediante Tubos de calor y por PCM, así también se pueden combinar estos métodos de enfriamiento entre sí para mejorar su eficacia. En la **Figura 10** se observa los resultados de investigaciones realizadas para cada tecnología de enfriamiento estudiadas en este apartado.

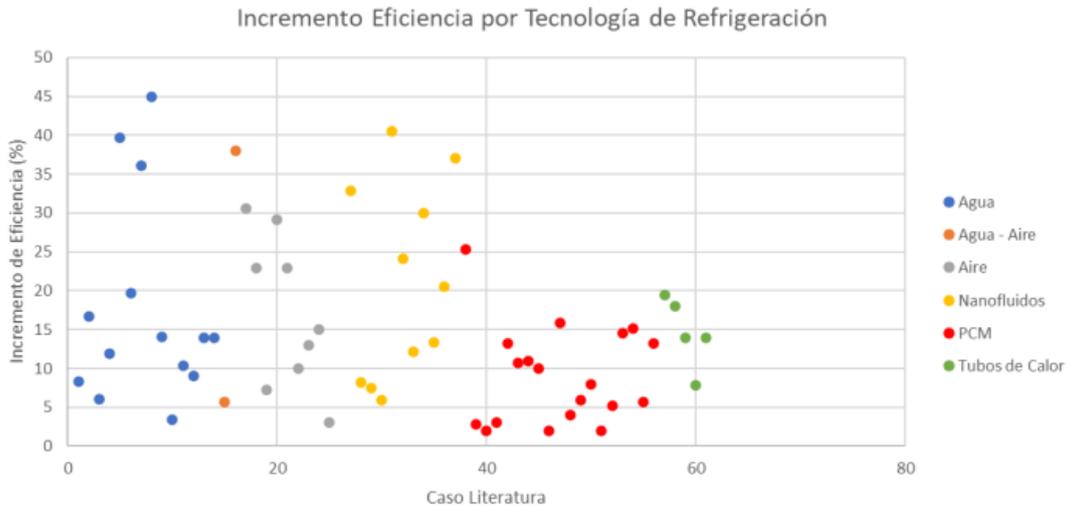


Figura 10. Incremento de la eficiencia por tecnología de refrigeración.

Fuente: Torres (2018).

4.1.8 Efectos de la temperatura en la eficiencia de los paneles fotovoltaicos.

La temperatura es uno de los principales factores que afectan la eficiencia de los paneles fotovoltaicos. El aumento de la temperatura del panel puede reducir la eficiencia de conversión de energía solar a electricidad. La disminución en la eficiencia se debe principalmente al aumento de la corriente de saturación y la disminución de la tensión de circuito abierto. Además, el aumento de la temperatura puede provocar la degradación del material y reducir la vida útil del panel.

Las aplicaciones prácticas para mitigar los efectos negativos de la temperatura en los paneles solares incluyen el uso de tecnologías de refrigeración. Algunas tecnologías de enfriamiento comunes son el enfriamiento por agua, el enfriamiento por aire y el enfriamiento por fase de cambio. Estos sistemas pueden mejorar la eficiencia de los paneles y prolongar su vida útil.

Además, el diseño del sistema de montaje también puede afectar la temperatura del panel. La ubicación de los paneles, el ángulo de inclinación y la orientación pueden influir en la cantidad de luz solar que recibe el panel y, por lo tanto, en su temperatura. Un diseño adecuado del sistema de montaje puede minimizar el impacto de la temperatura en la eficiencia del panel.

4.2 Capítulo 2: Transferencia de calor

4.2.1 Mecanismos de transferencia de calor

Existen tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación.

Partiendo del principio de conservación de la energía, para los estudios de transferencia de calor, los análisis se basan en la **Ecuación (3)** (Cengel & Ghajar, 2011).

$$\sum E_e = \sum E_s \quad (3)$$

Donde; E_e representa a la energía de entrada en la superficie de estudio y E_s es toda la energía que sale de dicha superficie mediante los diferentes mecanismos de transferencia de calor que se detallan a continuación.

4.2.1.1 Transferencia de calor por convección

La convección se divide en dos categorías principales según mecanismos físicos: convección natural (o libre) y convección forzada, en función de cómo se inicie el movimiento del fluido.

La convección forzada implica inducir el flujo del fluido sobre una superficie o dentro de un tubo mediante medios externos. En este caso, el movimiento del fluido es generado y controlado deliberadamente.

Por otro lado, en la convección natural, el movimiento del fluido es causado por medios naturales, como el efecto de flotación como se puede ver en la **Figura 11**. Este fenómeno se manifiesta cuando el fluido caliente tiende a ascender y el fluido frío a descender, generando una circulación natural sin la intervención de medios externos. Además, la convección se puede clasificar como externa o interna, según si el flujo del fluido se produce sobre una superficie externa o dentro de un conducto, respectivamente. A pesar de la complejidad de la convección, se observa que la razón de la transferencia de calor por este mecanismo es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa de manera conveniente por la ley de Newton de enfriamiento como se describe en la **Ecuación (4)** (Yunus A., 2013).

$$q_{cv} = h \times A_s (T_s - T_\infty) \quad (4)$$

Donde:

h : Es el coeficiente de transferencia de calor por convección, expresado en $W/m^2 \cdot ^\circ C$

A_s : Área superficial de transferencia de calor, m^2

T_s : temperatura de la superficie, $^\circ C$

T_∞ : temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie, $^\circ C$.

El coeficiente convectivo (h), expresado en la **Ecuación (5)**, determina la transferencia de calor por convección. Esta depende de dos fenómenos distintos que se caracterizan por la fuente de velocidad del fluido: convección natural y convección forzada explicados anteriormente.

$$h_1 = \frac{Nu \times k_f}{L} \quad (5)$$

Por lo general, la convección forzada resulta en un coeficiente convectivo más elevado en comparación con la convección natural, lo que explica por qué la transferencia de calor por convección es más eficiente en presencia de viento.

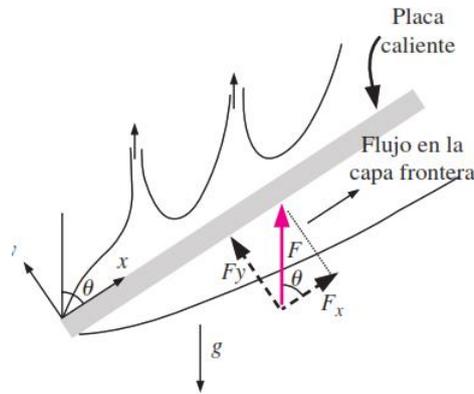


Figura 11. Flujos por convección natural de una placa inclinada caliente

Fuente: Cengel & Ghajar (2011).

Cuando existe transferencia de calor forzada se debe considerar el coeficiente de convección forzada y natural, h_f y h_n respectivamente. Estos coeficientes dependen de muchos factores como: la orientación del sólido respecto a la gravedad, su geometría, de las propiedades del aire.

Para el caso de la convección natural depende mucho de la velocidad del fluido que se calcula a partir del número de Nusselt (Nu), además de otros números adimensionales que se deben obtener para determinar el valor exacto de los coeficientes de transferencia de calor.

Mediante la **Ecuación** (6) se determina la temperatura del fluido T_f , para posteriormente Identificar las propiedades de ese fluido y aplicar los valores propuestos en el cálculo de los números adimensionales.

$$T_f = \frac{T_\infty + T_s}{2} \quad (6)$$

En convección forzada puede influir también la convección natural y de ser el caso se debe calcular los dos coeficientes de convección para obtener un coeficiente de convección combinado, en función de la dirección del flujo de la corriente de aire natural y si va a favor o en contra de la corriente del fluido forzado este debe sumarse o restarse. Para considerar si es necesario calcular un coeficiente de convección combinado se puede hacer aplicando la siguiente relación. Si el número de Grashof (Gr) entre el número de Reynolds elevado al cuadrado $\frac{Gr}{Re^2} < 0,1$; entonces la convección natural es despreciable, cuando el valor de $\frac{Gr}{Re^2}$ es

> 10, la convección forzada se considera insignificante. Sin embargo, cuando el valor está entre 0,1 y 10, ambas formas de convección deben ser consideradas ya que ninguna de ellas puede ser despreciada (Cengel & Ghajar, 2011).

4.2.1.1.1 Significado físico de los números adimensionales: Nusselt, Reynolds, Prandtl, Rayleigh y Grashof.

Reynolds. – se define de esta manera a la razón de las fuerzas de inercia entre las fuerzas viscosas del fluido como se muestra la **Ecuación (7)**. A partir de esta relación se define si un flujo es laminar, turbulento o si este se encuentra en transición (Cengel & Ghajar, 2011).

$$Re = \frac{VL}{\nu_f} = \frac{\rho VL}{\mu_f} \quad (7)$$

Para la ecuación anterior:

ν_f : es la viscosidad cinemática del fluido [m^2/s]

V : es la velocidad del fluido [m/s]

μ_f : viscosidad dinámica [$kg/m \cdot s$]

ρ : Densidad [kg/m^3]

Prandtl. – Este parámetro adimensional indica el espesor relativo de las capas límite de velocidad y térmica en un fluido, definido en la **Ecuación (8)**.

$$Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f} = \frac{\mu_f C_p}{k_f} \quad (8)$$

α_f : difusividad térmica [m^2/s^2]

C_p : Calor específico [$J/kg \cdot K$]

Nusselt. - Se define como la mejora en la transferencia de calor a través de una capa de fluido debido a la convección, en comparación con la conducción que tendría lugar en la misma capa, la forma general para calcular el número de Nusselt en diferentes situaciones es mediante correlaciones empíricas basadas en experimentos o mediante soluciones numéricas de ecuaciones diferenciales, estas correlaciones se presentan en la siguiente sección.

Rayleigh. - Se define como el producto de los números de Grashof y de Prandtl, por sí mismo puede considerarse como la razón de las fuerzas de flotabilidad y (los productos de) la difusividad térmica y de cantidad de movimiento, en la **Ecuación (9)** se muestra como calcular en número de Rayleigh y Grashof, El valor de β en la ecuación anterior corresponde al inverso de la temperatura del fluido (Cengel & Ghajar, 2011).

$$Ra = Gra \times Pr = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) \times L^3}{\nu_f^2} \cdot Pr = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) \times L^3}{\nu_f \times \alpha_f} \quad (9)$$

4.2.1.1.2 Correlaciones para calcular el número de Nusselt.

Una correlación correcta para calcular el número de Nusselt para convección forzada en una placa inclinada es la planteada por Churchill -Chu, como se detalla en la **Ecuación (10)**.

$$Nu = 0,037 Re^{0.8} \times Pr^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

Esta correlación se aplica para la siguiente condición: $Re < 5 \times 10^5$, $Pr > 0,6$

Para la transferencia de calor por convección natural en placa con cara caliente hacia arriba, se puede aplicar las correlaciones propuestas por Fujii e Imura (1972), ver **Ecuación (11)**.

$$Nu_e = 0.16((Gr_e \times Pr_e)^{\frac{1}{3}} - (Gr_c \times Pr_e)^{\frac{1}{3}}) + 0,56 * ((Gr_c \times Pr_e \cos\theta)^{\frac{1}{4}} \quad (11)$$

Donde:

Gr_e : Es el número de Grashof calculado a partir de la temperatura específica.

Pr_e : número de Prandtl en función de la temperatura específica.

θ : ángulo de inclinación del módulo fotovoltaico.

Gr_c : Magnitud de Grashof, en función de ángulo de inclinación, ver **Tabla 4**.

Esta correlación se cumple para el intervalo de $105 < Gr_c \times Pr_e \times \cos \theta < 1011$. La magnitud Gr_c , es una relación crítica del número de Grashof que indica cuando el número de Nusselt comienza a separarse de la relación laminar de la correlación anterior. Estos ángulos de inclinación se miden con respecto a la vertical, para superficies calientes con cara hacia arriba tiene una connotación negativa a diferencia de las superficies con cara caliente hacia abajo, para la cual se muestra una correlación en la **Ecuación (12)** (Fujii & Imura, 1970).

$$Nu_e = 0.58((Gr_e \times Pr_e)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

Tabla 4. Magnitud (Gr_c) en función del ángulo de inclinación.

θ , Grados	Gr_c
-15	5×10^9
-30	2×10^9
-60	10^8
-75	10^6

Fuente: Fujii & Imura, (1970)

Para obtener el coeficiente de transferencia de calor por convección natural en una placa inclinada se debe considerar una temperatura específica T_e para obtener las propiedades del fluido, esta temperatura se obtiene aplicando la **Ecuación** (13) (Fujii & Imura, 1970).

$$T_e = T_s - 0,25(T_s - T_\infty) \quad (13)$$

Esta ecuación nos ayudará a obtener las propiedades del fluido, para los análisis de transferencia de calor por convección natural.

4.2.1.2 Transferencia de calor por Radiación.

La transferencia de calor por radiación es uno de los mecanismos fundamentales mediante los cuales la energía térmica se transfiere de un cuerpo a otro en ausencia de contacto directo o de un medio de transferencia. Este fenómeno se basa en la emisión y absorción de radiación electromagnética por parte de los objetos.

En este contexto, se examinan las características de la radiación térmica y el intercambio de calor a través de la radiación.

Aunque todavía no se comprende completamente el mecanismo físico de la radiación, se reconoce que la energía radiante puede ser considerada tanto como ondas electromagnéticas o como fotones. Ninguna de estas perspectivas describe por completo la naturaleza de todos los fenómenos observados. Sin embargo, se tiene conocimiento de que la radiación se propaga a la velocidad de la luz, que en el vacío es igual a 3×10^8 m/s. Esta velocidad se determina como el producto de la frecuencia y la longitud de onda de la radiación (Kreith et al., 2012).

4.2.1.2.1 Radiación de un cuerpo negro.

Un cuerpo negro se define como un objeto que es un emisor y un absorbedor perfecto de radiación. A una temperatura y longitud de onda específicas, ningún otro objeto puede emitir más energía que un cuerpo negro. Un cuerpo negro absorbe toda la radiación incidente, sin importar su longitud de onda o dirección., además emite energía radiante de manera uniforme en todas las direcciones, por unidad de área normal a la dirección de emisión. Esto significa que es un emisor difuso, es decir, su emisión de radiación no depende de la dirección. La cantidad de energía radiante emitida por un cuerpo negro por unidad de tiempo y por unidad de área superficial fue determinada experimentalmente por Joseph Stefan en 1879 y se expresa como se indica en la **Ecuación** (14) (Cengel & Ghajar, 2011).

$$q_{rad} = \epsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (14)$$

Donde:

σ : es la constante de Stefan Boltzman, $5,670 \times 10^{-8}$ W/m²·K⁴.

ϵ : se llama poder de emisión de cuerpo negro.

4.2.1.2.2 *Propiedades de la radiación.*

Emisividad. - La emisividad de una superficie es la relación entre la radiación emitida por esa superficie a una temperatura determinada y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura. Se denota como ε y tiene un valor entre 0 y 1, donde $0 \leq \varepsilon \leq 1$. La emisividad proporciona una medida de cuán cercana es una superficie a comportarse como un cuerpo negro, donde un valor de igual a 1 indica una emisividad total.

La emisividad de una superficie real no es constante, varía con la temperatura de la superficie, la longitud de onda y la dirección de la radiación emitida. Por lo tanto, se pueden definir diferentes emisividades para una misma superficie según los efectos considerados. Una emisividad elemental de una superficie a una temperatura dada es la emisividad direccional espectral. Esta se define como la relación entre la intensidad de radiación emitida por la superficie en una dirección y longitud de onda específicas, y la intensidad de radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y longitud de onda. En otras palabras, se compara la radiación emitida por la superficie con la radiación emitida por un cuerpo negro en condiciones similares (Cengel & Ghajar, 2011).

Absortividad, reflectividad y transmisividad.

Cuando la radiación choca sobre una superficie, una parte es absorbida por dicha superficie, otra parte es reflejada y la parte restante es transmitida. Esto se puede entender de mejor manera en la **Figura 12**, estos tres factores se expresan en las **Ecuaciones** (15), (16) y (17) (Cengel & Ghajar, 2011).

$$\text{Absortividad: } \alpha = \frac{\text{Radiación absorbida}}{\text{Radiación incidente}} = \frac{G_{abs}}{G} \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (15)$$

$$\text{Reflectividad: } \rho = \frac{\text{Radiación reflejada}}{\text{Radiación incidente}} = \frac{G_{ref}}{G} \quad 0 \leq \rho \leq 1 \quad (16)$$

$$\text{Transmisividad: } \tau = \frac{\text{Radiación transmitida}}{\text{Radiación incidente}} = \frac{G_{tr}}{G} \quad 0 \leq \tau \leq 1 \quad (17)$$

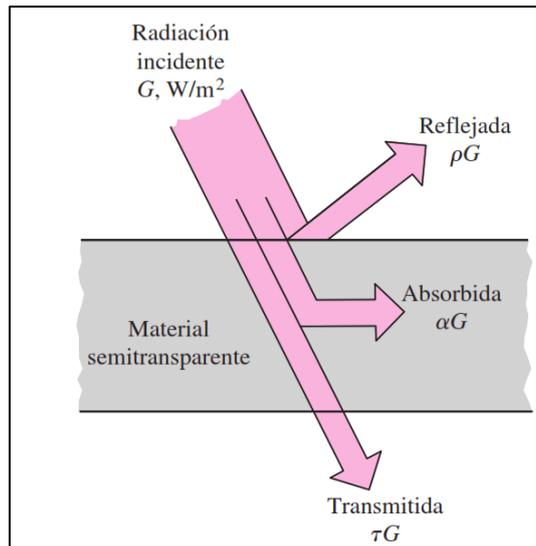


Figura 12. Factores de absorción, reflexión y transmisión de la radiación incidente por un material semitransparente.

Fuente: Cenjel, J & Ghajar A (2011).

En la **Tabla 6** se muestran algunos materiales con los valores de absorptividad, de reflectividad, transmisividad y adicionalmente se ha incluido la emisividad, esta tabla hace referencia a propiedades óptimas de un panel fotovoltaico. La emisividad del silicio y del Etileno Vinil Acetato (EVA) no se consideran en el estudio (Zhou et al., 2015).

Tabla 5. Propiedades de materiales de un panel solar fotovoltaico.

Material	Absortividad	Reflectividad	Transmisividad	Emisividad
Vidrio	0,04	0,04	0,92	0,85
EVA	0,08	0,02	0,9	-
Silicio	0,9	0,08	0,02	-
Tedlar	0,128	0,86	0,012	0,9

Fuente: Zhou et al., (2015).

4.3 Capítulo 3: Recurso eólico.

La energía eólica se deriva del viento, el cual se origina debido al calentamiento desigual de la atmósfera. Aproximadamente el 2% de la radiación solar se convierte en energía eólica. La distribución de la radiación solar en la Tierra es irregular, siendo las zonas tropicales y ecuatoriales las que reciben mayor radiación, mientras que las zonas polares reciben menos (Román & Villacrés, 2014).

Debido a que los rayos solares inciden perpendicularmente sobre las zonas tropicales y el ecuador, el aire se calienta y asciende, volviéndose menos denso. Por otro lado, en las zonas polares, donde llega menos radiación, el aire se enfría y desciende. Esto resulta en el

movimiento del aire cálido desde las zonas tropicales hacia los polos, mientras que el aire frío de los polos se desplaza hacia las zonas tropicales.

La rotación de la Tierra genera la fuerza de Coriolis, la cual tiene un impacto en la circulación del aire, esto se puede apreciar en la **Tabla 13**. Como resultado de esta fuerza, el aire asciende sobre el ecuador, formando un área de baja presión. A medida que los vientos alcanzan la tropopausa, la capa que separa la troposfera de la estratosfera, dejan de ascender y se desplazan hacia los lados: hacia el sur en el hemisferio sur y hacia el norte en el hemisferio norte. Este movimiento lateral contribuye a la circulación global de los vientos en la atmósfera.

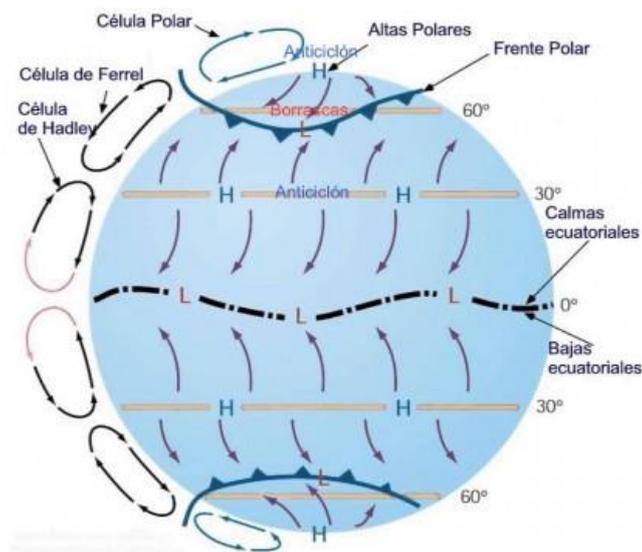


Figura 13. Efecto de la fuerza de corolis sobre la dirección de la circulación del aire.

Fuente: CEUPE (2016).

Debido al agotamiento de las reservas de energía no renovable, como el petróleo, carbón y gas natural, así como al impacto ambiental de su uso, se ha optado por buscar y utilizar nuevas tecnologías que aprovechen fuentes de energía renovable, en estas alternativas de aprovechamiento se encuentra la energía eólica.

4.3.1 Evaluación del recurso eólico.

Para evaluar el recurso eólico, se recopila información necesaria utilizando sistemas de adquisición de datos de las estaciones anemométricas. Esta información se combina con herramientas como el análisis del flujo de vientos, curvas de energía de turbinas eólicas, curvas de empuje y trazados eléctricos. El objetivo es obtener información actual y proyectada, como la velocidad media del viento, la densidad de potencia esperada y la producción energética anual esperada. Estos datos se utilizan para seleccionar los aerogeneradores más adecuados y estimar la producción de energía anual en función de esa selección (Román & Villacrés, 2014).

4.3.2 Información de mediciones del viento en la localidad.

A nivel de provincia, Loja se han realizado estudios de datos obtenidos de 10 estaciones meteorológicas, detalladas en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Estaciones meteorológicas en la provincia de Loja.

LONG	LAT	ALT	CÓDIGO	NOMBRE
-79.2	-4.04	2160	M033	LA ARGELIA, LOJA
-79.23	-3.62	2525	M142	SARAGURO
-79.27	-4.22	1453	M143	MALACATOS
-79.24	-4.31	1560	M145	QUINARA, INAMHI
-79.55	-4.33	1950	M146	CARIAMANGA
-79.17	-4.37	1835	M147	YANGANA
-79.95	-4.1	1984	M148	CELICA
-79.43	-4.23	2042	M149	GONZANAMA
-79.43	-4.58	1672	M150	AMALUZA, INAMHI
-80.24	-4.38	223	M151	ZAPOTILLO

Fuente: INAMHI (2010).

Adicionalmente se presenta la información de la velocidad media del viento anual, ver **Tabla 16**, según la información de los datos de las estaciones meteorológicas

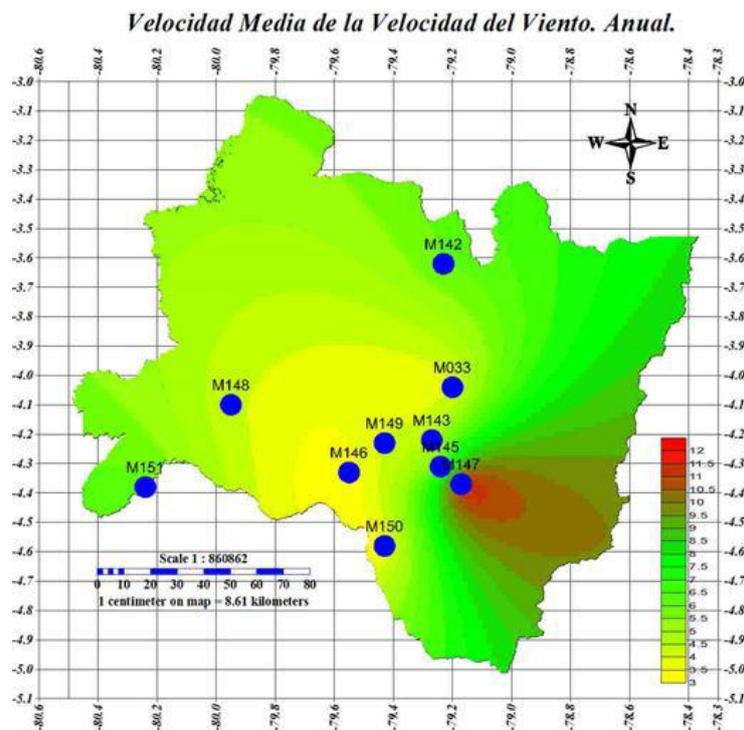


Figura 14. Velocidad media del viento anual 1982-2010.

Fuente: INAMHI (2010).

Luego de hacer una presentación de manera general a nivel de la provincia de Loja, en la presente sección, también se muestra información acerca de la velocidad del viento obtenida por la estación meteorológica de La Argelia, con datos registrados del año 2018 descritos en la **Tabla 7**, donde se obtiene la velocidad del viento media anual de 2,5 m/s.

Tabla 7. Velocidad media del viento, estación meteorológica La Argelia.

MES	Media (m/s)	Máxima (m/s)	Mínima (m/s)	Dirección dominante
Enero	2,10	2,07	1,00	Norte
Febrero	2,50	4,00	2,30	Norte
Marzo	2,30	3,00	0,21	Norte
Abril	2,20	5,00	2,00	Norte
Mayo	2,10	4,00	1,90	Norte
Junio	2,80	5,00	2,50	Norte
Julio	3,40	8,00	1,00	Norte
Agosto	4,30	5,50	0,30	Norte
Septiembre	2,70	8,00	1,00	Norte
Octubre	2,00	6,00	2,40	Norte
Noviembre	1,60	4,00	1,90	Norte
Diciembre	2,20	2,80	2,00	Norte
Anual	2,52	8,00	1,00	Norte

Fuente: INAMHI (2018).

Es importante indicar también el registro de datos de la temperatura obtenidos a través de esta estación meteorológica, en la **Tabla 8** se observa las temperaturas máximas y mínimas registradas durante los meses correspondientes al año 2018, así también se detalla la temperatura media anual.

Tabla 8. Temperaturas registradas año 2018 (°C).

MES	Máxima	Mínima	Media
Enero	25,5	6,0	24,5
Febrero	25,5	8,2	22,5
Marzo	24,6	9,8	22,3
Abril	24,5	8,0	21,7
Mayo	25,0	9,2	22,0
Junio	23,4	8,8	20,1
Julio	23,8	5,4	19,9
Agosto	22,3	7,3	19,7
Septiembre	26,7	3,8	22,0
Octubre	26,8	6,2	24,4
Noviembre	26,3	8,8	23,9
Diciembre	25,3	4,6	20,6
Anual	26,80	3,8	21,96

Fuente: INAMHI (2018).

4.3.3 Fuerza de arrastre.

La fuerza de arrastre, también conocida como resistencia aerodinámica, es aquella que se opone al movimiento de un objeto a través de un fluido, como el aire o el agua. Cuando un objeto se desplaza a través de un fluido, se generan fuerzas de fricción entre el objeto y el fluido circundante. Estas fuerzas de fricción se manifiestan como una resistencia al movimiento y son responsables de la fuerza de arrastre.

La fuerza de arrastre depende de varios factores, como la forma y el tamaño del objeto, la velocidad relativa entre el objeto y el fluido, la densidad del fluido y las propiedades físicas del objeto y del fluido. En el caso del aire, la fuerza de arrastre se puede calcular utilizando la ley de arrastre de Stokes o la ecuación de arrastre de Newton, que tienen en cuenta la forma del objeto y la velocidad relativa entre el objeto y el aire. En la **Ecuación (18)**, se expresa la fuerza de arrastre (F_D)(Mott, 2006).

$$F_D = C_D \times \left(\frac{\rho v_f^2}{2} \right) \times A_s \quad (18)$$

Donde:

C_D : Es el coeficiente de arrastre, que es un número adimensional que depende de la forma del cuerpo en estudio.

v : Es la velocidad del fluido en relación con el cuerpo

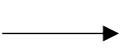
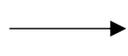
A_s : Es el área característica del cuerpo.

$\frac{\rho v_f^2}{2}$: Este término combinado hace referencia a la presión dinámica del fluido.

La presión dinámica se deriva del principio de conservación de la energía, que establece que la energía total de un fluido se mantiene constante en un flujo sin pérdidas.

El coeficiente de arrastre depende de la forma que presenta el cuerpo. En la **Tabla 9** se muestra algunos coeficientes de arrastre según la forma que presentan los cuerpos.

Tabla 9. Coeficientes de arrastre en formas típicas.

Elemento	Flujo de aire y forma	Coefficiente de arrastre
Esfera		0,47
Semiesfera		0,42
Cono		0,50
Cubo		1,05
Cubo inclinado		0,80

Cilindro largo		0,82
Cilindro corto		1,15
Cuerpo ahusado L/D=2,5		0,04
Cilindro semitubular.		1,12
Placa plana.		1,98

Fuente: Mott, (2006).

4.4 Capítulo 4: Diseño de sistemas de enfriamiento.

En este capítulo, se abordará el diseño de sistemas de enfriamiento para paneles fotovoltaicos. Estos sistemas desempeñan un papel fundamental en el funcionamiento eficiente y para prolongar la vida útil de los paneles solares. A continuación, se presentarán las consideraciones clave en el diseño de dichos sistemas, así como los componentes esenciales y los factores de diseño relacionados con su tamaño, forma, ubicación y orientación.

4.4.1 Consideraciones importantes en el diseño de un sistema de enfriamiento superficial para paneles fotovoltaicos.

Al diseñar un sistema de enfriamiento superficial para paneles fotovoltaicos, es fundamental tener en cuenta varios aspectos clave. Uno de los factores más importantes es la disipación efectiva del calor generado por los paneles solares. Según el estudio de Johnson et al. (2018), "el sobrecalentamiento de los paneles fotovoltaicos puede reducir significativamente su eficiencia y acortar su vida útil". Por lo tanto, es crucial garantizar que el sistema de enfriamiento proporcione una disipación de calor adecuada para evitar daños a largo plazo.

4.4.2 Componentes de un sistema de enfriamiento mediante aire.

Un sistema de enfriamiento superficial para paneles fotovoltaicos consta de varios componentes esenciales para garantizar la extracción de aire caliente que se acumula debajo de los paneles solares y reemplazarlo por aire fresco. Según el estudio de Wang et al. (2019), los elementos de un sistema de enfriamiento y el sistema en sí debe estar ubicado estratégicamente para el aprovechamiento máximo de la corriente de aire.

4.4.2.1 Diseño de componentes.

En el diseño de componentes es importante considerar varios factores tales como, las propiedades de los materiales que se utilizarán, definir las cargas y condiciones de carga, así como determinar la carga máxima esperada, análisis de momentos flectores, cálculos de esfuerzo flector.

4.4.2.1.1 Fuerza cortante y momento flector.

En la **Figura 15 a**, se muestra una viga que se apoya en las reacciones R_1 y R_2 cargada con las fuerzas concentradas F_1 , F_2 y F_3 . Si la viga se corta en alguna sección localizada en $x = x_1$ y se quita la parte izquierda como en un diagrama de cuerpo libre, deben actuar una fuerza cortante interna V y un momento flector M sobre la superficie cortada para asegurar el equilibrio. La fuerza cortante se obtiene sumando las fuerzas a la izquierda de la sección cortada. El momento flector es la suma de los momentos de las fuerzas a la izquierda de la sección tomada respecto de un eje a través de la sección aislada ver la **Figura 15 b** (Budynas & Keith Nisbett, 2012).

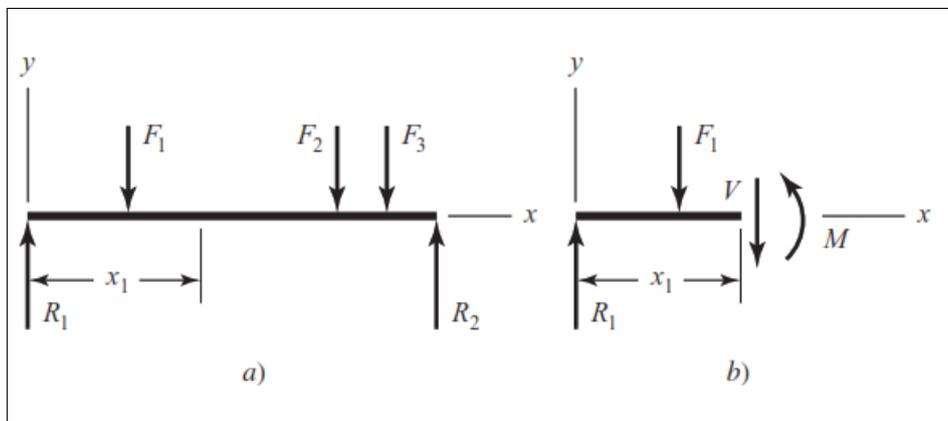


Figura 15. Diagrama de cuerpo libre que se muestra una fuerza cortante y un momento flector.

Fuente: Budynas & Keith Nisbett (2012).

El momento flector y la fuerza cortante se relacionan mediante la **Ecuación** (19)

$$V = \frac{dM}{dx} \quad (19)$$

4.4.2.1.2 Momentos flectores en sección circular.

En el diseño mecánico es muy común que ocurra flexión tanto en los planos xy como en plano xz .

Para el caso de secciones circulares sólidas todos los ejes laterales son iguales y el plano que contiene el momento correspondiente a la suma vectorial de M_z y M_y contiene los esfuerzos de flexión máximos. En el caso de una viga de diámetro d , la distancia máxima desde el eje

neutro es $d/2$, considerando que el momento rectangular de inercia $I = \frac{\pi \times D^4}{64}$, se puede expresar mediante la **Ecuación** (20) (Budynas & Keith Nisbett, 2012).

$$\sigma_{max} = \frac{M_c}{I} = \frac{32}{\pi \times d^3} \left(\sqrt{M_y^2 + M_z^2} \right) \quad (20)$$

4.4.2.1.3 Momentos flectores en placas rectangulares.

Para realizar un análisis en figuras planas para determinar sus características geométricas de cualquier complejidad, lo más importante consiste en determinar los ejes principales y los momentos de inercia principales.

En la **Figura 16** se muestran los ejes principales centrales x-x, e y-y. Adicionalmente se muestra el ángulo α , el cual puede ser calculado aplicando la **Ecuación** (21)

$$\alpha = 2\theta = 2 \left(\tan^{-1} \frac{M_y}{M_x} \right) \quad (21)$$

Donde M_y y M_x son los momentos flectores que actúan en los ejes x e y (Pisarenko et al., 1979)

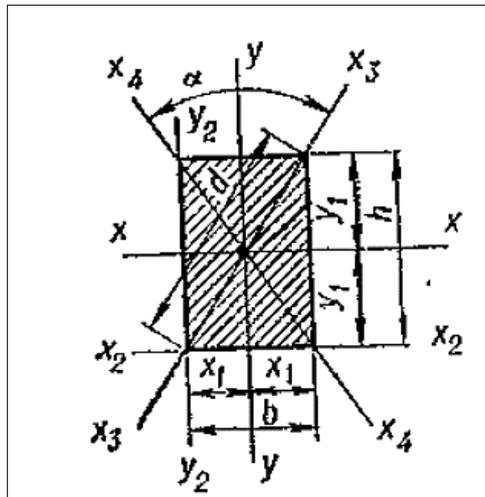


Figura 16. Ejes principales y características geométricas de un rectángulo.

Fuente: Pisarenko., n.d, (1979).

Los momentos de inercia con respecto a los ejes x_3 y x_4 corresponden a una misma ecuación y se pueden calcular aplicando la **Ecuación** (22).

$$I_{x3} = I_{x4} = \frac{d^4 \times \text{sen}^3 \alpha}{48} \quad (22)$$

Se puede realizar el análisis del esfuerzo de flexión del material y comprobar con el esfuerzo de flexión calculado, este último debe ser menor al esfuerzo máximo del material, ver **Ecuación** (23)

$$\sigma_{Mf} \geq \frac{M_f \times c \times n_s}{I_z} \quad (23)$$

Donde.

c: Es la distancia del eje neutro hasta la fibra más alejada del material.

n_s : Hace referencia al factor de seguridad utilizado para el cálculo. (Pisarenko et al., 1979).

4.5 Capítulo 5. Mediciones en paneles fotovoltaicos.

4.5.1 Protocolo de mediciones de temperatura y voltaje de un panel Fotovoltaico.

En esta sección, se detalla el protocolo utilizado para llevar a cabo las mediciones de temperatura y voltaje en los paneles solares. Esto implica describir los procedimientos exactos para realizar estas mediciones, incluyendo las herramientas y equipos específicos que se utilizan. Las mediciones de temperatura se realizan para comprender cómo el sistema de enfriamiento afecta la temperatura de los paneles solares, lo que a su vez puede influir en su eficiencia. Las mediciones de voltaje, por otro lado, podrían relacionarse con la generación de energía de los paneles solares bajo diferentes condiciones térmicas. La obtención de datos se basa en normativas como se describe en la siguiente sección.

4.5.2 Normas técnicas utilizadas.

4.5.2.1 IEC-61215.

En esta normativa entre otros factores se detallan las condiciones para monitorear temperaturas y voltaje en los paneles solares fotovoltaicos.

Equipo necesario.

Para realizar mediciones de temperaturas de la muestra de prueba y el dispositivo de referencia deberá tener una precisión de ± 1 °C, y repetibilidad de $\pm 0,5$ °C.

Un equipo para medir la corriente de la muestra de prueba y el dispositivo de referencia debe contar con una precisión de $\pm 0,2$ % de la lectura;

El equipo para medir el voltaje de la muestra de prueba y el dispositivo de referencia con una precisión de $\pm 0,2$ % de la lectura (IEC, 2016)

4.5.3 Métodos de cálculo en función de coeficientes de temperatura de un panel fotovoltaico.

Los valores de la potencia máxima $P_{m\acute{a}x}$, voltaje de circuito abierto V_{oc} y la corriente de cortocircuito I_{sc} , a excepción de este último varían considerablemente con los cambios de temperatura de la célula de los paneles fotovoltaicos. Estos valores pueden obtenerse teóricamente en función de los coeficientes de temperaturas que nos proporciona el fabricante, para cada variable descrita.

4.5.4 Temperatura de célula en un panel fotovoltaico

Existen varios modelos para obtener la temperatura de la célula fotovoltaica T_c , cabe destacar dos modelos importantes para obtener esta variable. El método más común es el de aproximación estándar, también denominado de la Temperatura de Operación Nominal de la Celda T_{NOCT} . Adicional al método estándar existen otros métodos diferente para calcular la temperatura de celda con mayor precisión, según (Mattei et al., 2006) se puede calcular el valor de la temperatura de celda T_c aplicando la **Ecuación** (24).

$$T_c = \frac{U_{PV}(v_v) \times T_\alpha + G * (\tau \times \alpha - \eta_{STC}(1 - \beta_{STC} \times T_{STC}))}{U_{PV}(v_v) + \beta_{STC} \times \eta_{STC} \times G} \quad (24)$$

Los parámetros η_{STC} y β_{STC} son la eficiencia y el coeficiente de temperatura de máxima potencia en condiciones estándar, G es la radiación incidente en el plano del panel fotovoltaico el valor para $\tau \times \alpha = 0,81$ y el término $U_{PV}(v_v)$, es un coeficiente de intercambio de calor, el cual se calcula aplicando la **Ecuación** (25) (Mattei et al., 2006).

$$U_{PV}(v_v) = 26,6 + 2,3 \times v_v \quad (25)$$

El factor v_v es la velocidad del viento.

4.5.4.1 Potencia máxima de generación de un panel solar.

La potencia máxima que puede generar un panel fotovoltaico bajo determinadas condiciones de temperaturas y radiación solar se expresa en la **Ecuación** (26) (Battioni et al., 2016).

$$P_{m\acute{a}x} = P_p \times \frac{G}{G_{STC}} \times (1 + \gamma_c \times (T_c - T_{STC})) \quad (26)$$

Donde, P_p : es la potencia del panel fotovoltaico.

G_{STC} : es la radiación solar en condiciones óptimas de funcionamiento ($1000 \text{ W}/\text{m}^2$)

γ_c : es el coeficiente de temperatura en relación a la potencia, este valor lo proporciona el fabricante.

T_c : es la temperatura de la célula solar.

T_{STC} : Es la temperatura de la célula solar en condiciones óptimas de funcionamiento (Kurtz et al., 2009).

4.5.4.2 Cálculo de voltaje de circuito abierto de un panel solar.

El voltaje de circuito abierto máximo denominado V_{ocTM} , en la cual interviene el coeficiente de temperatura para el voltaje β_c proporcionado por el fabricante se calcula aplicando la **Ecuación** (27) (Markvart, 2000).

$$V_{ocTM} = V_{oc} \times (1 + \beta_c \times (T_c - T_{STC})) \quad (27)$$

5. Metodología

5.1 Equipos y materiales

5.1.1 Recursos tecnológicos

Softwares:

- SolidWorks®
- Paquete Office®
- Mathcad

Sensores:

- Sensores de temperatura DS18B20.
- Voltímetro-Amperímetro Digital (30V-10A)

5.1.2 Equipos técnicos

- Multímetro digital Truper MUT-830.
- Anemómetro portátil K1000 KASTREL
- Equipos y elementos computacionales.
- Dos paneles solares policristalinos, marca Powest NERP50-8050.
- Arduino MEGA 2560
- Pantalla LCD 16x2

5.1.3 Materiales de construcción

En la **Tabla 10** se describen los materiales y elementos utilizados para la construcción del sistema.

Tabla 10. Materiales y elementos utilizados en la construcción del sistema.

Materiales.	Descripción.	Dimensiones
Tubo PVC	Se utilizó como ducto para la corriente de aire, para la salida del aire.	$\varnothing = 3''$ L= 2 m
Lámina galvanizada	Se empleó para la construcción del captador de corriente de aire y en la construcción de la veleta.	Espesor= 0,5mm A = 1,5 m ²
Perfil angular a 90° de alas iguales.	Este perfil se empleó para la construcción del soporte del sistema de captación de corriente de aire.	Dimensiones: 30 x 3 mm
Varía corrugada	Se empleó como eje de unión, entre la veleta y el captador de corriente de aire.	Diámetro= 8 mm; L= 1,10 m
Tubo de acero.	Empleado para la construcción del elemento giratorio.	D =3,5''; L= 0,3 m
Manzana de Bicicleta	Componente utilizado para el sistema de giro.	D= 10 mm L= 13,8 cm

5.2 Procedimiento

Para realizar el diseño y construcción del sistema de enfriamiento superficial de paneles fotovoltaicos, se llevó a cabo en varias etapas en función de cada objetivo planteado, con la finalidad de construir un sistema eficaz en la reducción de la temperatura superficial de los paneles fotovoltaicos.

Para diseñar un prototipo para aprovechar corrientes de aire y utilizarlo como sistema de enfriamiento superficial de paneles fotovoltaicos, se realizaron las actividades descritas a continuación.

Búsqueda de información. – Se realizó consultas en tesis, y artículos científicos, acerca de la tecnología de enfriamiento de sistemas fotovoltaicos mediante aire, para determinar los factores principales que influyen en estos sistemas.

Elegir los módulos fotovoltaicos que se utilizarán para el presente estudio. - Realizar una revisión de los paneles solares fotovoltaicos que se ofertan en los mercados nacionales, elegir dos de estos elementos de las mismas características para implementar el sistema de enfriamiento y realizar el estudio en comparación del panel fotovoltaico sin este sistema.

Planteamiento de los parámetros del sistema de enfriamiento. - La diferencia de temperatura a lograrse con la implementación del sistema, así como la velocidad del viento requerida se realizó con base en mediciones de temperaturas de la superficie de los paneles fotovoltaicos, se obtiene las temperaturas máximas alcanzadas durante 3 días ordinarios, en funcionamiento de carga máxima de los paneles utilizados. Se realizó el balance energético del panel solar fotovoltaico además de identificar las diferencias de temperatura que se pueden lograr a una determinada velocidad del viento. Mediante investigación bibliográfica sobre la velocidad media anual del viento en la localidad, considerando como un factor adicional se plantea la velocidad de la corriente de aire de entrada al sistema de enfriamiento.

Determinar los elementos que incluirá el sistema de enfriamiento. - Se estudiaron los componentes más importantes que el sistema requiere para reducir la temperatura en los paneles y luego se analizó cada uno de ellos para una mejor comprensión del funcionamiento. Mediante esta información se puede proponer la geometría de diseño, así como la resistencia necesaria para elegir los materiales.

Conceptualización y diseño de los componentes del sistema de enfriamiento. – En función del análisis de la tecnología de enfriamiento, los requerimientos técnicos del sistema y la disponibilidad del recurso eólico se realizó la propuesta del sistema de enfriamiento.

Planteamiento de un prototipo de prueba. – Se realizó una propuesta de prototipo según los requerimientos identificados.

Identificación de los parámetros finales de operación del prototipo. - Se realizaron mediciones de las variaciones de temperaturas obtenidas en la superficie del panel solar y se compararon con las temperaturas del panel sin el sistema de enfriamiento. A medida que se variará la velocidad del viento a la salida del sistema para identificar la velocidad idónea de enfriamiento.

Construcción de prototipo final del sistema de enfriamiento. – Se realizó la construcción final del prototipo con las correcciones necesarias en el diseño para lograr reducir la temperatura en el panel fotovoltaico, así también se reajustaron las dimensiones de los componentes del sistema considerando los resultados de las experimentaciones.

Evaluación de la eficacia del sistema. – Mediante pruebas de funcionamiento y mediciones realizadas se determinó la eficacia del sistema para disminuir la temperatura superficial de los paneles fotovoltaicos.

Análisis de costos del sistema de enfriamiento construido. – Para determinar los costos finales del prototipo se incluyó en una nómina, los costos de los materiales, elementos adquiridos y procesos de construcción, así como mano de obra requerida para ello.

En la **Figura 17**, se presenta un diagrama de flujo que describe todo el proceso de desarrollo de la presente investigación.

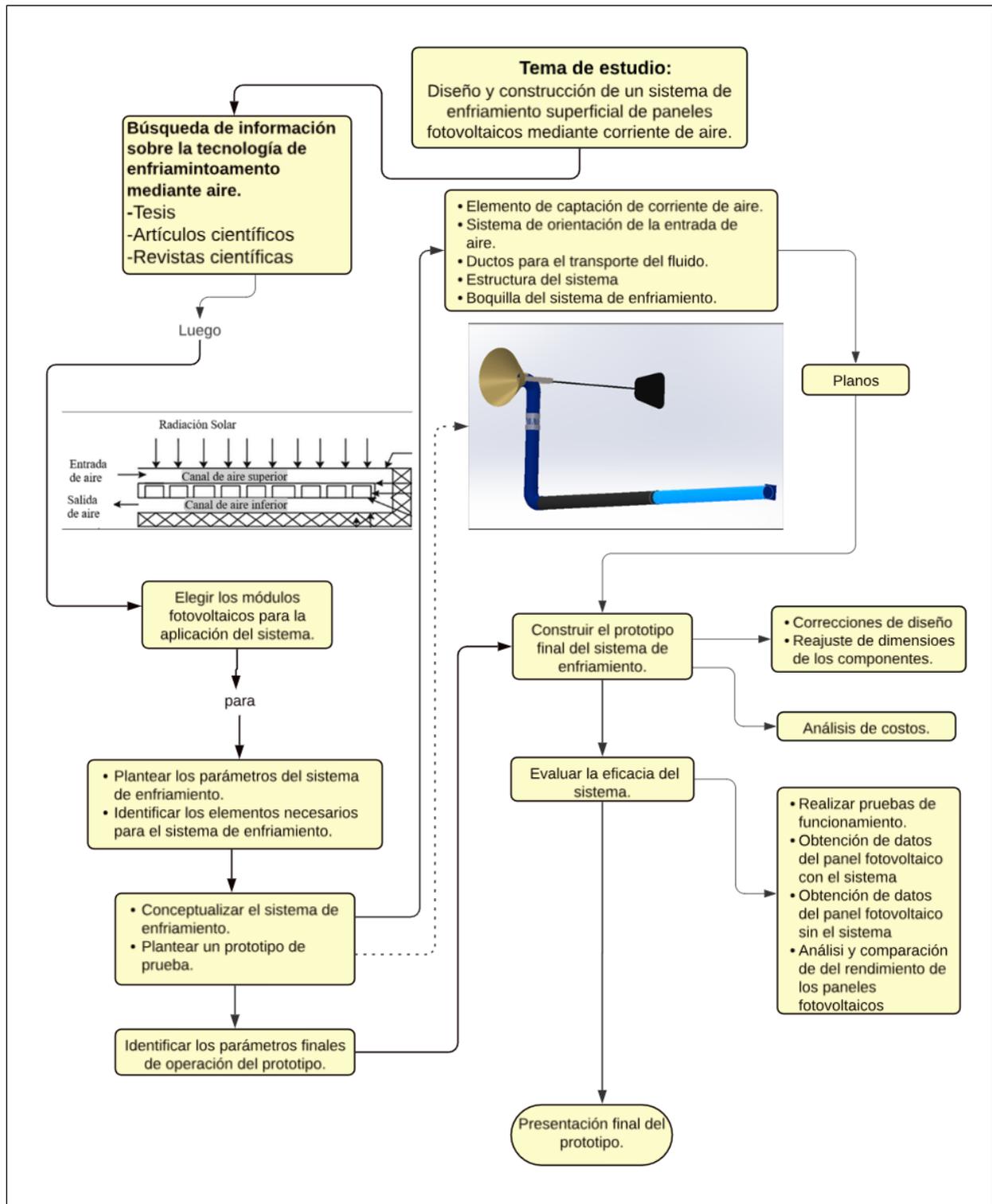


Figura 17. Diagrama de flujo de la metodología de desarrollo del presente trabajo de tesis.

5.3 Procesamiento y análisis de datos

5.3.1 Primer Objetivo

5.3.1.1 Información sobre los elementos principales que influyen en enfriamiento de paneles fotovoltaicos mediante aire.

El uso de aire como método de gestión térmica en comparación a otros métodos resulta menos eficiente si comparamos con el uso de los líquidos, pero las ventajas que ofrece este método en cuanto a utilización mínima de materiales, así como costos de operación lo posiciona como alternativa de estudio.

Se realizó una recopilación de información de estudios realizados con aplicación de enfriamiento de paneles fotovoltaicos mediante la circulación de aire, investigaciones plasmadas en tesis y artículos científicos, como se describen:

(Sajjad et al., 2019) demostraron que el uso de la técnica de enfriamiento por aire resultó en un aumento del 7,2% en la producción de energía eléctrica y un aumento del 6% en la eficiencia general, en comparación con los módulos fotovoltaicos sin enfriamiento, en la **Figura 18** se presenta la instalación del sistema de enfriamiento de la experimentación descrita.



Figura 18. Sistema de enfriamiento de paneles fotovoltaicos mediante intercambiador de calor.

Fuente: Sajjad et al., (2019).

Analizando las experimentaciones referentes al enfriamiento de paneles por aire de: (Mazón-Hernández et al., 2013), (Tonui & Tripanagnostopoulos, 2007), (Elminshawy et al., 2019), (Linares, 2022), se obtuvo varios elementos considerados en sus experimentaciones. Haciendo una lista resumida de los factores a considerar se para implementar un sistema de enfriamiento.

En la ciudad de Riyadh- Arabia Saudita, Almuwailhi & Zeitoun, (2021) investigaron los efectos del enfriamiento por convección natural, convección forzada y enfriamiento evaporativo en el rendimiento de los paneles PV policristalinos. En el enfriamiento por convección forzada, el aire se introdujo mediante ventiladores instalados en la abertura inferior

del canal de enfriamiento con diferentes velocidades de aire (1, 2 y 3 m/s). En la **Figura 19** se observa, en la sección (a) experimentos de convección natural y convección natural con evaporación y (b) experimentos de convección forzada y convección forzada con evaporación.

Los resultados experimentales del enfriamiento por convección natural revelaron que el uso de un espacio de aire de 120 mm para enfriar el panel solar contribuyó a un aumento en la producción diaria de energía y la eficiencia del panel en un 1,7% y un 1,2%, respectivamente. Para el enfriamiento por convección forzada, el uso de aire a una velocidad de 3 m/s aumentó la producción diaria de energía en un 4,4% y la eficiencia en un 4% y finalmente el enfriamiento evaporativo por convección natural aumentó la producción diaria de energía y la eficiencia en un 3,6% y un 2,7%, respectivamente (Almuwailhi & Zeitoun, 2021).

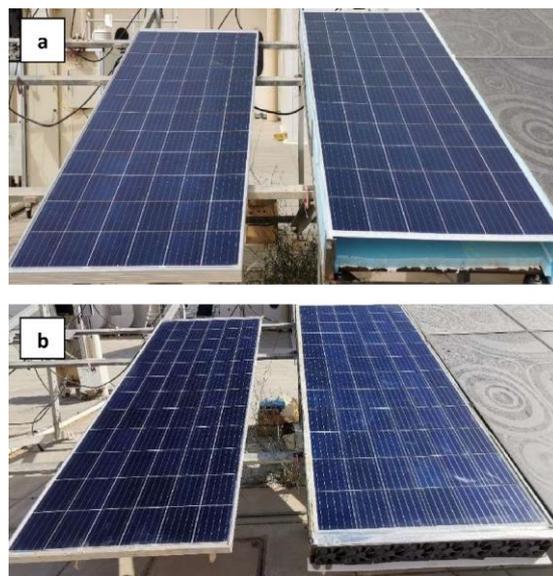


Figura 19. Sistema de enfriamiento por convección natural, forzada con y sin evaporación.

Fuente: Almuwailhi & Zeitoun (2021).

En la **Tabla 11** se definen los factores que inciden sobre la temperatura superficial de los paneles solares.

Tabla 11. Factores a considerar para la implementación de un sistema de enfriamiento.

Elementos que influyen en el enfriamiento de paneles mediante aire.		
Factor	Requerimiento.	Impacto en el enfriamiento sobre el panel solar.
Temperatura ambiente.	Cercana a la óptima de funcionamiento	Afecta en la transferencia de calor por convección natural.
Velocidad del viento.	Constante	Reduce la temperatura superficial del panel.
Inclinación de los paneles.	Adecuada	Afecta en la radiación solar que incide sobre los paneles, y eleva o disminuye la temperatura superficial.
Transferencia de calor por convección.	Elevada	Reduce la temperatura superficial.
Transferencia de calor por radiación.	Elevada	Reduce la temperatura superficial
Potencia eléctrica.	Máxima.	Influye en la cantidad de calor generado y, por lo tanto, ayuda a reducir la temperatura del panel.

5.3.1.2 Elegir los módulos fotovoltaicos que se utilizarán para el presente estudio.

Existen varios tipos de paneles fotovoltaicos clasificados según el tipo de células solares, tales como: de silicio monocristalinos, policristalinos, y amorfos, cada uno tiene sus ventajas y desventajas en función de la aplicación que se realiza.

Para una selección adecuada de los paneles fotovoltaicos se realizó una matriz de ponderación puntuada en el **Anexo 1** considerando los siguientes criterios de evaluación: eficiencia, resistencia térmica, durabilidad, disponibilidad y costo.

Adicionalmente en la **Tabla 12** se presentan algunos modelos de paneles fotovoltaicos y sus rangos de potencia disponibles.

Tabla 12. Marcas y modelos de paneles fotovoltaicos.

Tipo de panel	Marca	Series	Rendimiento	Potencias disponibles, (W)
Monocristalino	Sanyo	HIT-BE; HIT-NHE	21,6%	195, 200, 210, 215.
	Connera	ASTRAL	18 a 18%	290, 295, 300, 305, 310
	Powest	NERP	17,8 a 21%	120, 160, 200, 300, 360.
Policristalino	Kyocera	KC; KC; GHT2	14 a 16%	40, 50, 65, 85, 130, 175, 200.
	Powest	SZYL	14,1 a 16,5%	30,50,100,150, 280, 345.

	Connera	ASTRAL-II	16 a 16,5%	265, 270, 275,280, 325, 330,335
Amorfo	Kaneka	GEA (60)	8,5%	60 W
	Bosch	a-Si	9,5%	75, 80, 85, 90
	Solars-China	KS-A	9,5%	15, 20, 25

5.3.1.3 Planteamiento de los parámetros del sistema de enfriamiento.

Para identificar los parámetros necesarios para el funcionamiento del sistema de enfriamiento, se realizó el balance energético del panel solar fotovoltaico al que se le aplicará el estudio. En la **Figura 20** se aprecia el diagrama del balance energético del panel solar, donde se consideran las siguientes variables: la Irradiación absorbida G_{abs} , potencia eléctrica P_e , temperatura de la superficie del panel T_s , pérdidas p (por acumulación de polvo, debido a sombras, entre otras), transferencia de calor por convección en cara superior e inferior q_{cv1} y q_{cv2} , transferencia de calor por radiación por cara superior e inferior q_{rad1} y q_{rad2} respectivamente.

La inclinación de los paneles fotovoltaicos se calculó a partir de la Ecuación (2).

$$\beta_{op} = 3,7 + 0,69 \times |\phi|$$

El valor de latitud del área de estudio es de 4° .

$$\beta_{op} = 3,7 + 0,69 \times |4^\circ|$$

$$\beta_{op} = 6,46^\circ$$

Debido que la inclinación obtenida es inferior a la mínima recomendada se tomará el valor de 15° para la instalación de los paneles fotovoltaicos.

$$\beta_{op} = 15^\circ$$

A continuación, se describe el proceso de cálculo de transferencia de calor.

Se consideró la temperatura óptima de funcionamiento del panel fotovoltaico recomendada por el fabricante y para el valor de la radiación solar se ha considerado la Irradiación solar promedio de la ciudad de Loja, (lugar donde se realiza el estudio).

Partiendo del balance energético del panel solar aplicando la Ecuación (3).

$$\sum E_e = \sum E_s$$

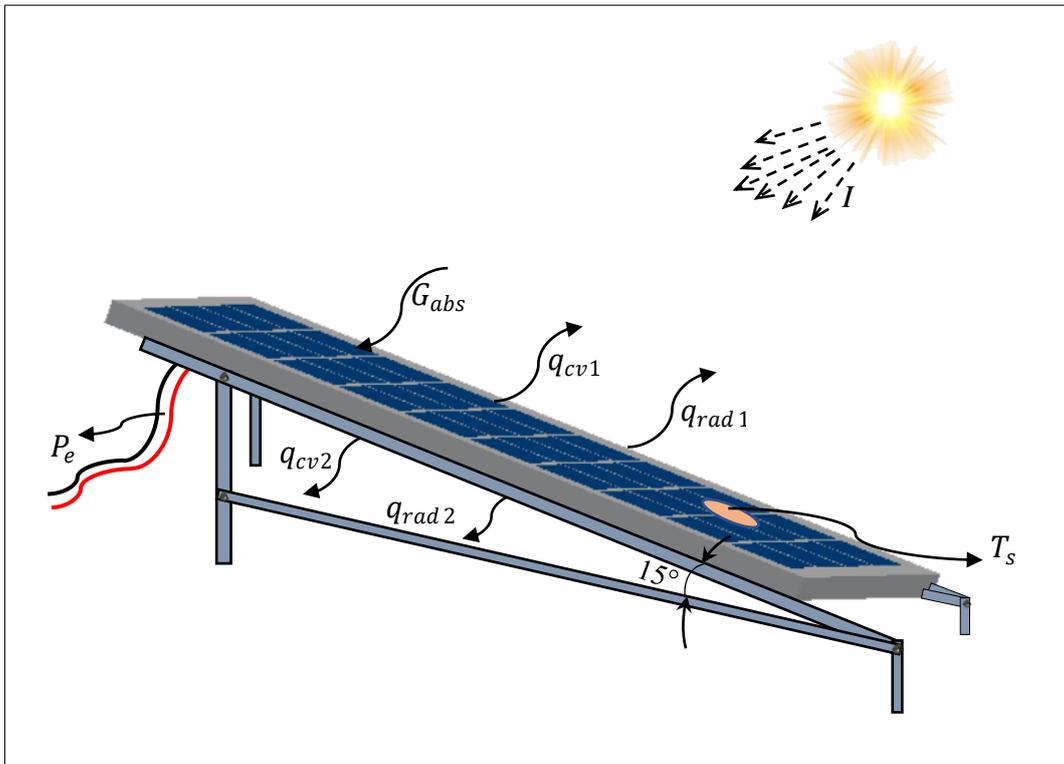


Figura 20. Diagrama del balance energético del panel solar fotovoltaico.

Aplicada a nuestro sistema de estudio se expresa como ecuación final:

$$G_{abs} = q_{cv1} + q_{rad1} + q_{cv2} + q_{rad2} + P_e + p$$

En el **Anexo 2**, se muestra una tabla con los valores de las mediciones de temperaturas en días ordinarios, a partir de estos datos se considera para los cálculos de transferencia de calor por radiación y convección, como placa inclinada con la cara caliente hacia abajo.

5.3.1.3.1 *Potencia absorbida por el panel.*

$$G_{abs} = G_s \times \alpha \times A_s$$

Donde el valor de la radiación solar será considerado el valor promedio descritos en la Tabla 1, $G_s = 539,12 \frac{W}{m^2}$ y α es la absorptividad descrita en la Ecuación 13 que corresponde a 0,92 para la superficie del panel fotovoltaico.

$A_s = 0,66 \text{ m} \times 0,54 \text{ m} = 0,3564 \text{ m}^2$ tomado del **Anexo 3**, especificaciones técnicas del panel solar, el valor de la longitud crítica L es de 0,54 m.

$$G_{abs} = 539,12 \frac{W}{m^2} \times 0,92 \times 0,54 \text{ m} \times 0,66 \text{ m} = 176,77 \text{ W}$$

En la **Tabla 13** se incluye las variables para el desarrollo de cálculos de transferencia de calor

de todos los factores descritos en el balance energético del panel solar.

Tabla 13. Variables para el desarrollo de los factores considerados en el balance de energía del panel solar.

Variable	Descripción	Valor	Referencia
T_s	Temperatura superficial del panel, temperatura óptima de funcionamiento.	25 °C	Anexo 3
T_∞	Temperatura ambiente media, del lugar de estudio.	21,96 °C	Tabla 8
V_{cv1}	Velocidad del viento considerada para convección natural, mínima anual.	$1 \frac{m}{s}$	Tabla 7
V_{vs}	Velocidad del viento propuesta para la salida del sistema de enfriamiento	$5 \frac{m}{s}$	Autor
η	Eficiencia del panel solar.	14,1%	Anexo 3
V_{oc}	Voltaje de circuito abierto del panel solar.	22,5 V	Anexo 3
I_{sc}	Corriente de cortocircuito del panel solar	2,86 A	Anexo 3
L	Longitud crítica del panel, longitud que recorre el viento.	0,54 m	Anexo 3
θ	Ángulo de inclinación del panel solar con respecto a la vertical.	75°	Ecuación (1)
ε_1	Emisividad por la cara superior del panel.	0,85	Tabla 4
ε_2	Emisividad por la cara superior del panel.	0,90	Tabla 4
A_s	Área de la superficie del panel solar.	0,356 m ²	Anexo 3
V_{mp} :	Voltaje en el punto de potencia máxima	18,7 V	Anexo 3
I_{mp} :	Corriente en el punto de potencia máxima.	2,68 A	Anexo 3
V_s	Velocidad del viento a la salida del sistema de enfriamiento	3,0 m/s	Autor

En la **Figura 21** se muestra un diagrama del proceso de cálculo para elegir las condiciones de funcionamiento del sistema de enfriamiento y determinar la temperatura del panel que puede alcanzar utilizando el sistema de enfriamiento.

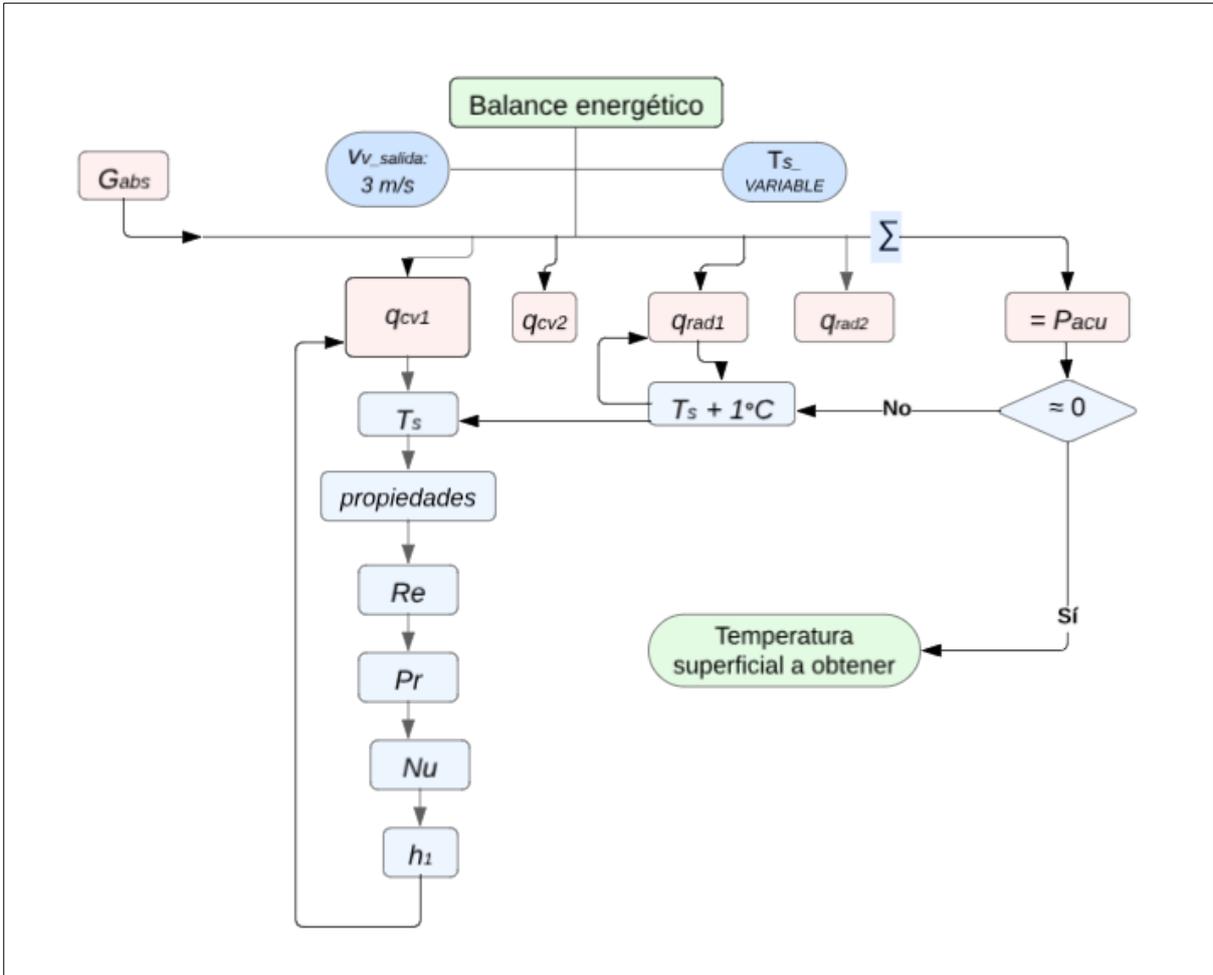


Figura 21. Diagrama del proceso de cálculo para obtener la temperatura superficial en el panel fotovoltaico.

5.3.1.3.2 Cálculos de transferencia de calor por convección, aplicando el sistema de enfriamiento.

Se realizó los cálculos par convección forzada por la cara superior del panel y para convección libre para la cara inferior.

- Transferencia de calor por convección forzada en la cara superior (q_{cv1}).

Para este cálculo se debe analizar si existe transferencia de calor combinada incluyendo la transferencia de calor natural.

Se obtiene la temperatura equivalente T_e del fluido, para ello se aplicó la Ecuación (13).

$$T_e = 25^\circ\text{C} - 0,25(25^\circ\text{C} - 21,96^\circ\text{C})$$

$$T_e = 25^\circ\text{C} - 0,76^\circ\text{C}$$

$$T_e = 24,24^\circ\text{C}$$

Propiedades del fluido para la temperatura equivalente T_e

$$V_{f_e} = 1,555 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$k_{f_e} = 0,02545 \frac{\text{W}}{\text{m} \times \text{K}}$$

$$Pr_e = 0,7298$$

$$\alpha_{f_e} = 2,1308 * 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

El valor de β se obtiene con el valor de la Temperatura del Fluido T_f .

$$\beta = \frac{1}{296,63 \text{ K}}$$

Luego se calculó el número de Reynolds, Prant y Grashof (equivalentes), mediante las Ecuaciones (7), (8) y (9), para hallar el número de Grashof equivalente se debe considerar el ángulo del panel solar.

$$Re_e = \frac{v_{cv1} \times L}{V_{f_e}} = \frac{1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,54 \text{ m}}{1,555 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 34.726,69$$

$$Pr_e = \frac{v_{f_e}}{\alpha_{f_e}} = 0,7298$$

$$Gra = \frac{(g * \cos \theta) \times \beta \times (T_s - T_{\infty}) \times L^3}{V_{f_e}^2}$$

$$Gra_e = \frac{\left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \cos(75^\circ)\right) \frac{1}{296,63 \text{ K}} (3,04 \text{ K}) \times (0,54 \text{ m})^3}{\left(1,555 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)^2}$$

$$Gra_e = 16'945.104,15$$

Se determina si cumple la condición de $10^5 < Gr_c \times Pr_e \times \text{Cos } \theta < 10^{11}$

$Gr_c \times Pr_e \times \text{Cos } \theta = 3,2 \times 10^6$, es decir sí cumple la condición.

Para identificar si es necesario considerar la transferencia de calor por convección natural combinada con la forzada se aplicó la condición $\frac{Gr}{Re^2} < 0,1$ y se obtiene un valor de $0,014 < 0,1$ donde se demuestra que la convección natural se considera despreciaba bajo las condiciones de estudio planteadas.

Al considerar únicamente la transferencia de calor forzada se aplica la correlación de por Churchill -Chu planteada en la Ecuación (10). Para ello se obtiene las propiedades del fluido con la temperatura $T_f = 23,48 \text{ }^\circ\text{C}$

$$V_f = 1,548 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$k_f = 0,0254 \frac{\text{W}}{\text{m} \times \text{K}}$$

$$Pr = 0,73$$

Se calcula Re para la velocidad propuesta de salida en el sistema de enfriamiento.

$$Re = \frac{v_{sv} \times L}{V_f} = \frac{3 \frac{m}{s} \times 0,54 \text{ m}}{1,548 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}}$$

$$Re = 104.651,16$$

Calculando Nu_1

$$Nu_1 = 0,037 Re^{0,8} Pr^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu_1 = 0,037 (104.651,16)^{0,8} (0,73)^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu_1 = 345,49$$

Aplicando la Ecuación (5) se obtiene el coeficiente de transferencia de calor para \dot{q}_{cv1}

$$h_1 = \frac{345,49 \times 0,0254 \frac{W}{mK}}{0,54 \text{ m}}$$

$$h_1 = 16,25 \frac{W}{m^2K}$$

Mediante la Ecuación (4) se calcula el valor de q_{cv1}

$$q_{cv1} = h_1 \times A_s (T_s - T_\infty)$$

$$q_{cv1} = 16,28 \frac{W}{m^2K} \times 0,356 \text{ m}^2 (3,04 \text{ K})$$

$$q_{cv1} = 17,58 \text{ W}$$

- Transferencia de calor por convección natural en la cara inferior (q_{cv2}).

Para este cálculo se aplica la correlación expresada en la Ecuación (11). Las propiedades del fluido utilizadas son con base en la temperatura T_{fe}

$$Nu_e = 0,58 (Gr_e \times Pr_e)^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu_e = 0,58 ((16'945.104,15 \times 0,7298 Pr_e)^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu_e = 134,13$$

Aplicando la Ecuación (5) se obtiene el coeficiente de transferencia de calor para q_{cv2}

$$h_{cv2} = \frac{Nu_e \times k_f}{L}$$

$$h_{cv2} = \frac{134,13 \times 0,02545 \frac{W}{mK}}{0,54 \text{ m}}$$

$$h_{cv2} = 6,32 \frac{W}{m^2K}$$

Luego se obtiene el valor de transferencia de calor por convección por la cara inferior.

$$q_{cv2} = 6,32 \frac{W}{m^2 K} \times 0,356 m^2 \times 3,04 K$$

$$q_{cv2} = 6,84 W$$

5.3.1.3.3 Cálculos de transferencia de calor por radiación.

- Transferencia de calor por radiación cara superior q_{rad1} .

Se calcula aplicando la Ecuación (14).

$$q_{rad1} = \epsilon_1 \sigma A_s (T_s^4 - T_\infty^4)$$

$$q_{rad1} = 0,85 \times \left(5,670 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \times K^4} \right) \times 0,356 m^2 \times (298,15^4 - 295,11^4) K^4$$

$$\dot{q}_{rad1} = 5,45 W$$

- Transferencia de calor por radiación cara inferior \dot{q}_{rad2} .

Al igual que en la cara superior se aplica la misma ecuación, pero con diferente coeficiente de emisividad.

$$q_{rad2} = \epsilon_2 \sigma A_s (T_s^4 - T_\infty^4)$$

$$q_{rad2} = 0,90 \times \left(5,670 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \times K^4} \right) \times 0,356 m^2 \times (298,15^4 - 295,11^4) K^4$$

$$q_{rad2} = 5,77 W$$

5.3.1.3.4 Cálculo de la potencia eléctrica generada por el panel solar fotovoltaico P_e .

Para los paneles fotovoltaicos en estudio la potencia eléctrica es 0, al no encontrarse conectados a ninguna

Finalmente realizamos la sumatoria de todos los factores estudiados dentro del balance energético.

$$G_{abs} = q_{cv1} + q_{cv2} + q_{rad1} + q_{rad2} + P_{acu}$$

$$176,77 W = 17,58 + 6,84 W + 5,45 W + 5,77 W + P_{acu}$$

$$176,77 W = 35,64 W + P_{acu}$$

Al finalizar el proceso de cálculo se obtiene una diferencia de 116,21 W

$$P_{acu} = 141,13 W$$

Una vez descrito el procedimiento de cálculo en el balance de energía de nuestro sistema se desarrolla variaciones en la temperatura de la superficie del panel con la finalidad de obtener un sistema equilibrado, esto conlleva a tolerar niveles de temperatura sobre la superficie del panel solar más elevados de la temperatura óptima, pero inferiores a temperaturas sin usar el sistema de enfriamiento, calculado en la siguiente sección.

5.3.1.3.5 Cálculos de transferencia de calor por convección, sin sistema de enfriamiento.

Aplicado el método de cálculo en la sección anterior se considera todos los valores obtenidos similares a excepción de la transferencia de calor por la cara superior del panel, para la cual se calculará mediante la correlación de la Ecuación (11), al considerarse únicamente convección natural.

Aplicando la correlación de la Ecuación (11), se calcula el número de Nusselt Nu_e . Para esta ecuación la magnitud Gr_c se obtiene de la **Tabla 4**, para la inclinación del panel de 75° con respecto a la vertical.

$$Nu_e = 0,16((Gr_e \times Pr_e)^{\frac{1}{3}} - (Gr_c \times Pr_e)^{\frac{1}{3}}) + 0,56 \times ((Gr_c \times Pr_e \cos\theta)^{\frac{1}{4}})$$

$$Nu_e = 0,16((16'945.104,15 \times 0,7298)^{\frac{1}{3}} - (729.800)^{\frac{1}{3}}) + 0,56((729.800 \cos(-75^\circ))^{\frac{1}{4}})$$

$$Nu_e = 34,30$$

Luego se obtiene el coeficiente de transferencia de calor h_{cv2} aplicando la Ecuación (5).

$$h_{cv2} = \frac{Nu_e \times k_f}{L}$$

$$h_{cv2} = \frac{34,30 \times 0,02540 \frac{W}{m \cdot K}}{0,54 m} = 1,61 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Finalmente obtenemos el valor de transferencia de calor por convección aplicando la Ecuación (4).

$$q_{cv2} = h_{cv2} \times A_s (T_s - T_\infty)$$

$$q_{cv2} = 1,61 \frac{W}{m^2 K} (0,66 m \times 0,54 m) (3,04 K) = 1,75 W$$

Realizando un análisis de todo el sistema se obtiene.

$$G_{abs} = q_{cv1} + q_{cv2} + q_{rad1} + q_{rad2} + P_{acu}$$

$$176,77 W = 1,75 W + 6,84 W + 5,45 W + 5,77 W + P_{acu}$$

$$176,77 W = 19,81 W + P_{acu}$$

$$P_{acu} = 156,96 W$$

En la **Tabla 14** se muestran las temperaturas de la superficie superior del panel con el sistema de enfriamiento (T_{P1_Sup}) y la temperatura que alcanza el panel que no utiliza el sistema de enfriamiento (T_{P2_Sup}). Los datos se obtuvieron de acuerdo a la metodología de cálculo descrita anteriormente. La temperatura ambiente se considera constante de $21,96^\circ C$, así como la radiación solar considerada la radiación promedio de $539,12 \frac{W}{m^2}$.

Tabla 14. Temperaturas del panel en la cara superior con el sistema de enfriamiento y sin el sistema

T_{P1_Sup}	T_{P2_Sup}	ΔT	qcv_{P1}	qcv_{P2}	V_{vs}
34,92 °C	36,23 °C	1,34 °C	30,89 W	13,95 W	1,0 $\frac{m}{s}$
34,19 °C	36,23 °C	2,10 °C	40,33 W	13,95 W	1,5 $\frac{m}{s}$
33,57 °C	36,23 °C	2,66 °C	48,23 W	13,95 W	2,0 $\frac{m}{s}$
33,03 °C	36,23 °C	3,20 °C	54,98 W	13,95 W	2,5 $\frac{m}{s}$
32,55 °C	36,23 °C	3,68 °C	60,92 W	13,95 W	3,0 $\frac{m}{s}$
32,13 °C	36,23 °C	4,10 °C	66,19 W	13,95 W	3,5 $\frac{m}{s}$
31,74 °C	36,23 °C	4,49 °C	70,88 W	13,95 W	4,0 $\frac{m}{s}$

En la **Tabla 15** se muestra la variación de temperatura al variar la radiación solar considerando la velocidad de 3 m/s para el panel solar con el sistema de enfriamiento.

Tabla 15. Variación de Temperaturas de los paneles en función de la Radiación solar.

T_{P1_Sup}	T_{P2_Sup}	ΔT	qcv_{P1}	qcv_{P2}	G
32,55 °C	36,23 °C	3,68 °C	60,92 W	13,95 W	539,12 $\frac{W}{m^2}$
32,75 °C	36,48 °C	3,73 °C	62,07 W	14,28 W	550 $\frac{W}{m^2}$
33,65 °C	37,60 °C	3,95 °C	67,17 W	15,77 W	600 $\frac{W}{m^2}$
34,54 °C	38,70 °C	4,16 °C	72,22 W	17,25 W	650 $\frac{W}{m^2}$
35,42 °C	39,80 °C	4,38 °C	77,21 W	18,76 W	700 $\frac{W}{m^2}$
36,30 °C	40,87 °C	4,57 °C	82,16 W	20,26 W	750 $\frac{W}{m^2}$
37,17 °C	41,94 °C	4,77 °C	87,07 W	21,79 W	800 $\frac{W}{m^2}$
38,03 °C	42,98 °C	4,95 °C	91,93 W	23,30 W	850 $\frac{W}{m^2}$
38,88 °C	44,02 °C	5,14 °C	96,79 W	24,81 W	900 $\frac{W}{m^2}$
39,75 °C	45,05 °C	5,30 °C	101,68 W	26,33 W	950 $\frac{W}{m^2}$

5.3.1.3.1 Elementos del sistema de enfriamiento.

En la **Tabla 16** se presenta una lista de los componentes del sistema de enfriamiento propuesto y la función que desempeñan.

Tabla 16. Componentes del sistema de enfriamiento.

Elemento o componente	Cant.	Descripción.	Proceso de adquisición.
Boquilla del sistema de enfriamiento.	1	Elemento que envía la corriente de aire hacia la superficie del panel solar a enfriar. Este componente tiene un área de 0,0066 m ²	Diseño y construcción
Captador de corriente de aire	1	Este componente capta la corriente de aire y eleva su velocidad gracias a su forma de tobera convergente.	Diseño y construcción
Veleta.	1	Su utilidad es direccionar el capador de la corriente de aire en dirección del viento en todo momento.	Diseño y construcción
Eje de la veleta.	1	El eje es la unión entre la veleta y el captador de air	Diseño y construcción
Codo de 90	2	Direcciona el flujo de aire desde el eje de captación hacia el eje vertical del sistema de enfriamiento en la parte superior y en la parte inferior se dirige hacia la boquilla	Mercado local
Ductos	2 m	Transporte de corriente de aire.	Mercado local
Eje vertical	1	Se utiliza para unir la parte móvil con la parte fija del sistema por el centro de la tubería vertical.	Diseño y construcción
Elemento giratorio.	1	Este elemento permite unir la parte móvil y fija del sistema de enfriamiento. Se utiliza como eje de apoyo del captador de corriente de aire y la veleta.	Diseño y construcción
Base	1	Cumple la función de soporte del sistema de enfriamiento.	Construcción.

5.3.1.4 Conceptualización del sistema de enfriamiento y diseño de sus componentes.

Para definir el sistema de enfriamiento propuesto se ha considerado el funcionamiento de algunos sistemas de enfriamiento ya existentes aplicados a paneles solares fotovoltaicos, los elementos definidos para el sistema de enfriamiento son.

- Boquilla del sistema de enfriamiento.
- Captador de corriente de aire.
- Sistema de orientación del captador de aire.
- Ductos para transportar el aire

- Componente giratorio del sistema de enfriamiento.
- Base del sistema de enfriamiento.

5.3.1.4.1 *Boquilla del sistema de enfriamiento.*

Para el dissipador de aire, se consideró la longitud de la ranura para la salida del aire de 0,66 m de longitud del panel solar como se muestra en el **Anexo 3** y una altura propuesta de 1cm. Para elegir la forma final de la boquilla de aire se realizó algunas simulaciones mediante software, para determinar la forma idónea de la boquilla de tal manera que el flujo de aire sea uniforme en toda la longitud del panel solar como se muestra en el **Anexo 5 - f**).

En la **Figura 22**. Donde, h_r es la altura de la ranura y L es la longitud de la ranura igual a la longitud del panel solar, como se aprecia en la

$$A_s = 0,01 \text{ m} \times 0,66 \text{ m}$$

$$A_s = 0,0066 \text{ m}^2$$

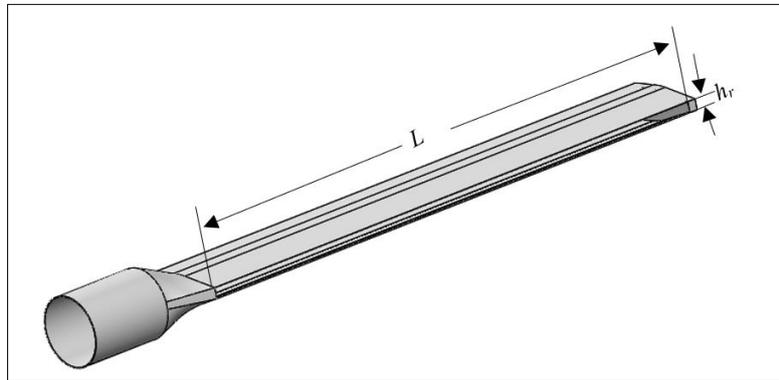


Figura 22. Esquema del elemento de distribución de aire.

5.3.1.4.2 *Captador de corriente de aire.*

Partiendo del principio de conservación de la masa se obtiene el área de entrada de corriente de aire. El caudal de salida es igual al caudal de entrada denotados con $Q_e = Q_s$, para este caso se tiene la velocidad de entrada del viento v_e y el área de entrada del mismo A_e .

La velocidad de entrada del viento se consideró la velocidad mínima anual de la ciudad de Loja, es de 0,21 m/s según **Tabla 7**. Aplicando el principio de conservación de la masa se obtiene el diámetro de entrada para el captador de corriente de aire D_e , en la cual interviene el caudal de salida Q_s ya conocido a partir de la velocidad de salida y el área.

$$Q_e = Q_s = v_s \times A_s$$

$$Q_s = v_s * A_s = 3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,0066 \text{ m}^2 = 0,0198 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Despejando D_e .

$$Q_e = v_e \times \frac{\pi \times D_e^2}{4}$$

$$D_e = \sqrt{\frac{4 \times Q_e}{v_e \times \pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0,0198 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,21 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \pi}} = 0,3464 \text{ m}$$

$$D_e = 34,64 \text{ cm} \approx 35 \text{ cm}$$

Las dimensiones iniciales del captador de corriente de aire, son $0,5 D_e$, detallada en la **Figura 23**.

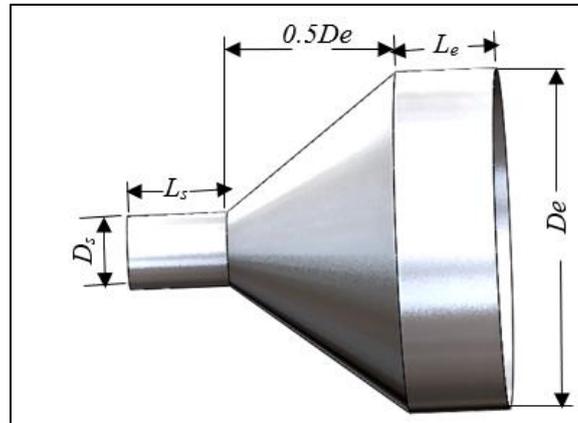


Figura 23. Captador de corriente de aire (diámetro de entrada de 0,35 m).

Con la geometría del elemento de captación de aire descrito en la Figura anterior se realizaron algunas simulaciones mediante Software mostradas en el **Anexo 5**, a) donde se muestra el aumento de la velocidad a la salida del componente.

Este componente es construido y se desarrollan pruebas de funcionamiento, realizando mediciones de la velocidad del viento a la entrada y salida del componente, ver **Anexo 6 a)**, donde se obtienen resultados de elevación de velocidad en un 30,9%.

Para mejorar la velocidad a la salida del componente se plantea un aumento del diámetro a la entrada, para el cual se realizan simulaciones del componente como se muestra en el **Anexo 5 b)**. El nuevo diámetro planteado de entrada del componente es de 70 cm como se indica en la **Figura 24**.

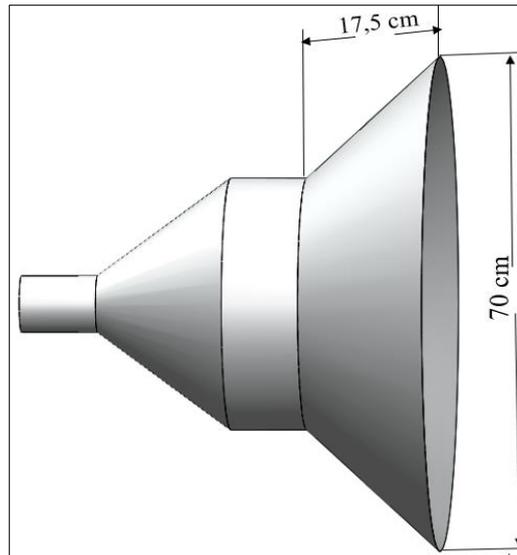


Figura 24. Dimensiones del captador de corriente de aire

5.3.1.4.3 *Diseño de la veleta.*

Para calcular el área de la veleta se aplicaron algunas relaciones de molinos de viento existentes, en la **Tabla 17** se muestran los valores obtenidos de relaciones del Área incidente A_I con respecto al área de la veleta A_2 , así también se muestra las relaciones entre las longitudes desde el centro de masa del molino de viento (L_2) y la veleta (L_1) hasta el eje central.

Tabla 17. Relaciones de construcción de sistemas de giro.

Elemento	Relación de áreas. A_I / A_2	%	Relación de longitudes. L_2 / L_1
a	8,43	11,86%	2,50
b	6,18	16,18 %	3,47
c	8,55	11,70%	2,96

Con el análisis indicado en la tabla anterior se consideraron valores de dimensiones para la veleta contenidas dentro de esos rangos.

Para las relaciones de área se puede observar que una relación válida obtenida del área de la veleta es 8,43 veces menor al área de incidencia del viento, es decir un 11,86% del área incidente

- El área de incidencia de captación A_i en función de la relación de áreas descritas en la **Tabla 17** se obtiene.

$$A_i = 0,1186 \times \frac{\pi \times D_e^2}{4}$$

$$A_i = 0,1186 \times \frac{\pi \times (0,70 \text{ m})^2}{4} = 0,04564 \text{ m}^2$$

- Se plantea inicialmente el área de la veleta igual al área incidente obtenida $A_v = 0,04564 \text{ m}^2$.

En la **Figura 25**, y se detalla el diagrama de la parte móvil del sistema de enfriamiento donde se presentan las cargas en los ejes “y” y “z”. En el eje “y” se tiene los pesos del captador de corriente de aire (W_1), eje de la veleta (W_2) y el peso de la veleta (W_3). En el eje “z” se muestran las Fuerza de arrastre del viento, las cuales difieren en función del coeficiente de forma de los componentes, F_1 para el captador y F_2 para la veleta.

Adicionalmente en el esquema se muestran las distancias desde el centro de masa hasta el eje central, distancia del captador d_c , del eje que une la veleta d_e y la distancia de la veleta como d_v .

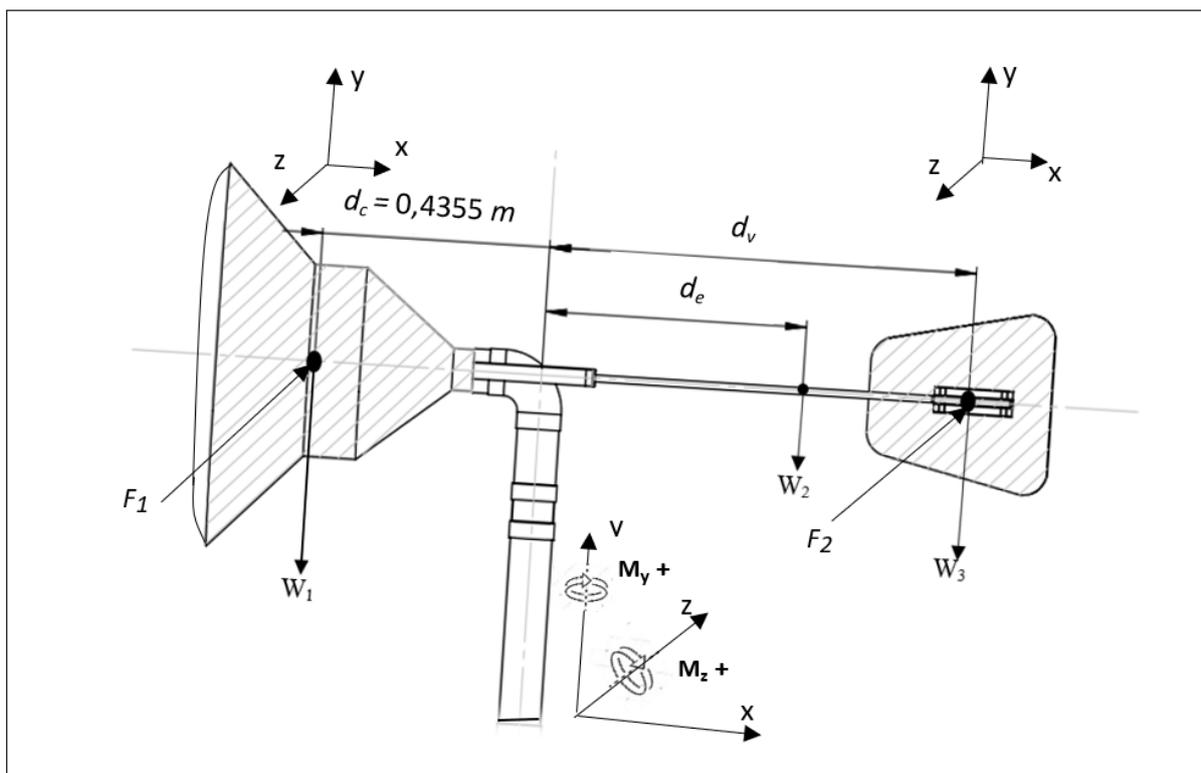


Figura 25. Esquema de momentos en el sistema de giro.

La distancia mínima de la veleta d_v , desde el eje central hasta su centro de masa, se obtiene aplicando la relación mínima de distancias de un factor de 2,5 de la **Tabla 17** por la distancia del captador d_c .

$$d_v = 2,5 \times d_c$$

$$d_v = 2,5 \times 0,4355 \text{ m} = 1,08 \text{ m}$$

Para recalcular el área total de la veleta se obtiene el área el área proyectada del captador de corriente de aire, la cual genera una fuerza de resistencia de giro. En la **Figura 26** se muestra

el área proyectada del captador de aire (A_{pc}) y sus dimensiones, de esta manera se obtiene el área de resistencia.

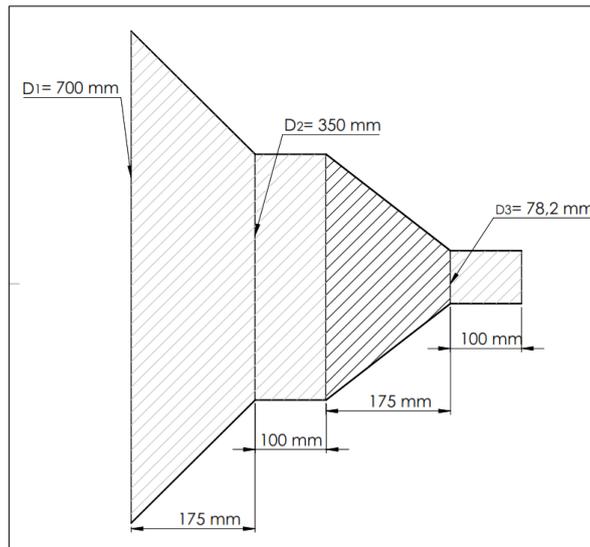


Figura 26. Área proyectada del captador de aire.

$$A_{pc} = \frac{(D_1 + D_2) \times 0,175 \text{ m}}{2} + (D_2 \times 0,1 \text{ m}) + \frac{(D_2 + D_3) \times 0,175 \text{ m}}{2} + (D_3 \times 0,1 \text{ m})$$

$$A_p = (0,0919 + 0,035 + 0,0375 + 0,00782) \text{ m}^2$$

$$A_{pc} = 0,1722 \text{ m}^2$$

Mediante la aplicación de sumatoria de Momentos en el eje “y” M_y se tiene:

$$\Sigma M_y = 0$$

$$F_1 \times d_c = F_2 \times d_v$$

Donde F_1 es la carga del viento en el captador de aire y F_2 es la carga del viento en la sección de la veleta. Esta carga se calcula aplicando la Ecuación (18) y según los coeficientes de resistencia para cilindro corto y placa plana, denominados Cd_1 y Cd_2 respectivamente, ver

Tabla 9.

$$F_1 = Cd_1 \left(\frac{\rho v_f^2}{2} \right) A_p$$

La densidad del aire utilizada se obtiene del **Anexo 4**, para la temperatura ambiente promedio de la 21,96 °C.

$$F_1 = 1,15 \times \frac{1,196 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left(* 1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2}{2} \times 0,1722 \text{ m}^2 = 0,1184 \text{ N}$$

$$F_2 = Cd_2 \left(\frac{\rho v_f^2}{2} \right) A_v$$

$$F_{D_2} = 1,98 \times \frac{1,196 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left(1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2} \times A_{pv} = 1,184 \times A_{pv} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m} \times \text{s}^2}\right)$$

Aplicando la sumatoria de momentos se tiene.

$$F_1 \times d_c = F_2 \times d_v$$

$$0,1184 \text{ N} \times 0,4355 \text{ m} = 1,188 \times A_{pv} \times 1,08 \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}^2}\right)$$

Despejando el área proyectada de la veleta A_{pv} .

$$A_{pv} = \frac{(0,1184 \times 0,4355) \text{ N} \cdot \text{m}}{(1,188 \times 108) \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}} = 0,0402 \text{ m}^2$$

Finalmente se obtiene el valor del Área total de la veleta A_v .

$$A_v = A_i + A_{pv}$$

$$A_v = 0,04564 \text{ m}^2 + 0,0402 \text{ m}^2$$

$$A_v = 0,08584 \text{ m}^2$$

5.3.1.4.4 Cálculo del diámetro del eje de la veleta

Para determinar el diámetro mínimo del eje de la veleta se calculó el peso total de la veleta, con base en los datos de los materiales utilizados, ver **Anexo 7**.

La veleta incluye dos componentes soldados de ángulo de acero cuyas dimensiones son de 15cm de longitud, 20mm de ancho y 3mm de espesor, su masa es de 0,872 kg/m

$$masa_{angulos} = 0,872 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \times 0,30 \text{ m} = 0,26 \text{ kg}$$

La masa del acero galvanizado de espesor de 0,5 mm es de 5,496 kg/m²

$$masa_{veleta} = 0,08548 \text{ m}^2 \times 5,496 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 0,47 \text{ kg}$$

El peso de la veleta W_3 se calcula a partir del área de la veleta más el peso de los ángulos soldados en la superficie.

$$W_3 = (masa_{angulos} + masa_{veleta}) \times g$$

$$W_3 = (0,73 \text{ kg}) \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$W_3 = 7,16 \text{ N}$$

En la **Figura 27** se muestra en el diagrama las cargas del eje que une la veleta y el captador de aire, las cuales están ubicadas en dos planos. En el plano xy están el peso de la veleta (W_3) y el peso del eje (W_2) y en el plano xz actúa la fuerza del viento.

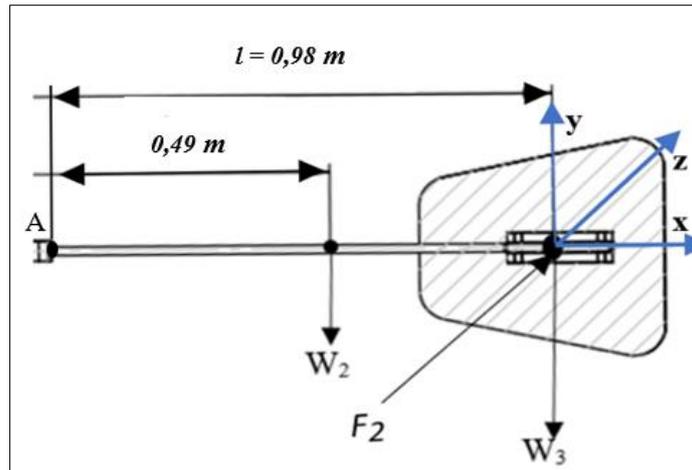


Figura 27. Diagrama de cargas que intervienen sobre el eje.

El peso W_2 está en función del diámetro del eje, con los datos proporcionados en el Anexo 9 se puede obtener la densidad promedio del material del eje.

$$\rho = 7.853,9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$l = 0,98 \text{ m}$$

Utilizando la ecuación del volumen de un cilindro y con la densidad se obtiene la expresión del peso W_2 .

$$W_2 = V \times \rho \times g$$

Resolviendo.

$$W_2 = \frac{\pi \times d^2}{4} l \times \rho \times g = \frac{\pi \times d^2}{4} \times 0,98 \text{ m} \times 7.853,9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$W_2 = 59302,14 d^2 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

- El momento flector respecto a las cargas en y.

$$\Sigma M_A = 0$$

$$\Sigma M_A = (W_3 \times l) + (W_2 \frac{l}{2})$$

$$\Sigma M_A = (7,16 \text{ N} \times 0,98 \text{ m}) + \left(59302,14 d^2 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \times 0,49 \text{ m} \right)$$

$$M_z = (7,02 \text{ Nm} + 29058,05 d^2) \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

El cálculo de la fuerza que actúa sobre la veleta, en el z se obtiene a partir de la velocidad máxima del viento alcanzada en el lugar de estudio, con un valor máximo de 8m/s, ver **Tabla**

7.

$$F_{D2 \text{ máx}} = 1,98 * \frac{1,196 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \left(8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2}{2} \times 0,08548 \text{ m}^2$$

$$F_{D_2 máx} = 0,8097 \text{ N}$$

$$\Sigma M_y = 0$$

$$\Sigma M_A = 0,98 \text{ m} \times 0,8097 \text{ N}$$

$$M_y = 0,7935 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Luego se obtiene el factor de seguridad a partir del **Anexo 11**, con un valor $n_s = 2,35$ (A=Mb; B= p; C= b; D=ns y E=s)

Aplicando la Ecuación (20) se obtiene la expresión para calcular el diámetro.

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 \times 2,35}{\pi \times \sigma_{max}} \left(\sqrt{M_y^2 + M_z^2} \right)}$$

De las propiedades físicas del material detallado en el **Anexo 9**, se muestra el límite de fluencia mínimo del material de 420 Mpa

$$d = \sqrt[3]{\frac{32}{\pi \times 420 \text{ Mpa}} \left(\sqrt{\left(7,02 \text{ Nm} + 29058,05 d^2 \frac{\text{N}}{\text{m}}\right)^2 + (0,7935 \text{ N} \cdot \text{m})^2} \right)}$$

Aplicando el método de iteraciones se obtiene el diámetro aproximado.

$$d \approx 0,0074 \text{ m} \approx 7,4 \text{ mm}$$

El diámetro comercial, inmediato superior corresponde a 8 mm.

El peso del eje de la veleta de 8mm de diámetro y longitud de 0,98 m, de material de varilla corrugada es de 3,80 N, según las especificaciones del material indicadas en el **Anexo 9**.

En la **Figura 28** se muestra el diagrama de fuerza cortante y el momento flector para las fuerzas que actúan en direcciones del eje y y z respectivamente.

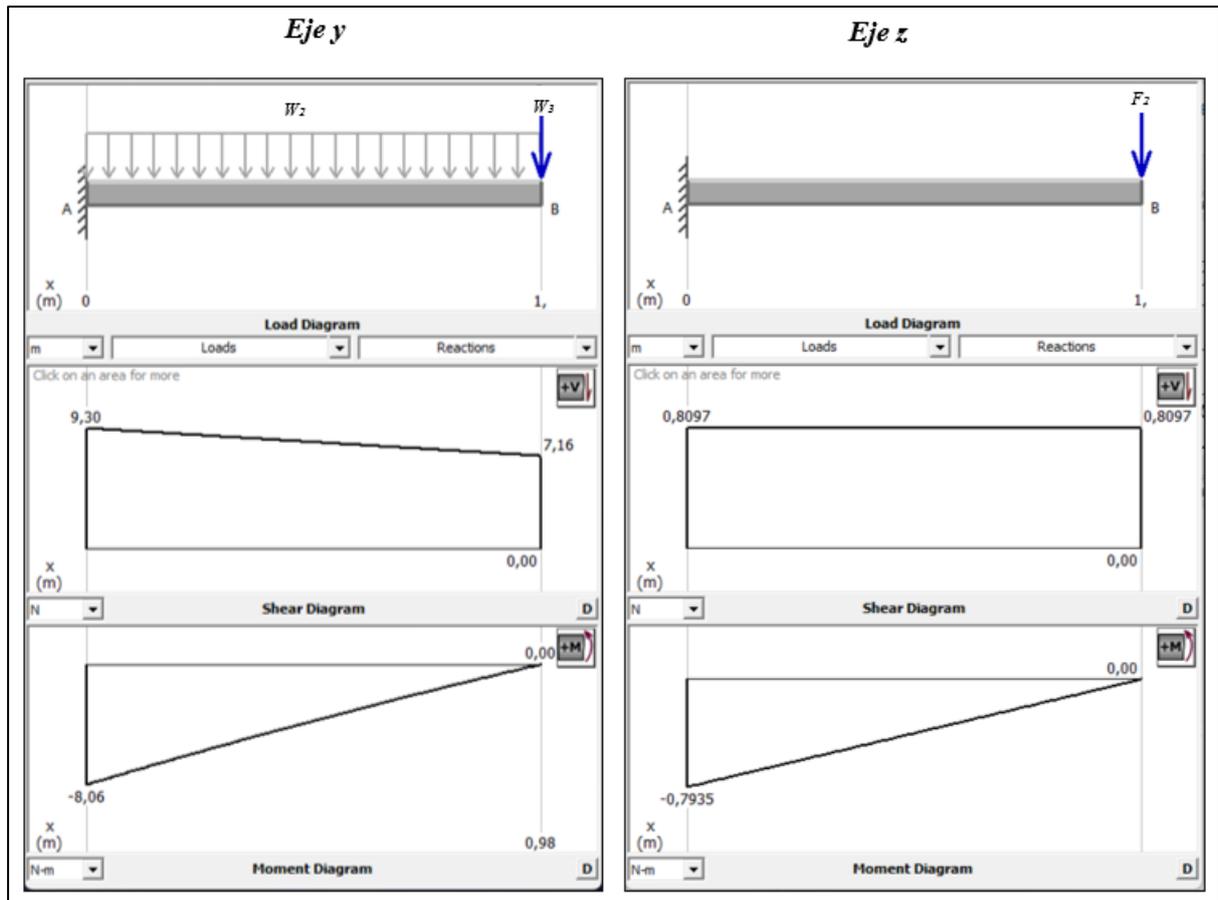


Figura 28. Diagramas de fuerza cortante y momento flector en los ejes y y z.

5.3.1.4.5 *Cálculo de espesor de la placa que une el captador con la veleta.*

En la **Figura 29** se muestra las cargas que intervienen para el cálculo del espesor de la placa rectangular del componente que une la veleta con el captador de corriente de aire.

Es importante considerar que adicional a los pesos W_2 y W_3 ya conocidos, para este cálculo se desprecia el peso que corresponde a la sección de la placa rectangular. Las cargas que intervienen serán repartidas entre las dos placas rectangulares que se presentan en la figura anterior.

$$\frac{W_2}{2} = 1,90 \text{ N}$$

$$\frac{W_3}{2} = 3,58 \text{ N}$$

$$\frac{F_2}{2} = F_{D_2 \text{ máx}} = 0,4048 \text{ N}$$

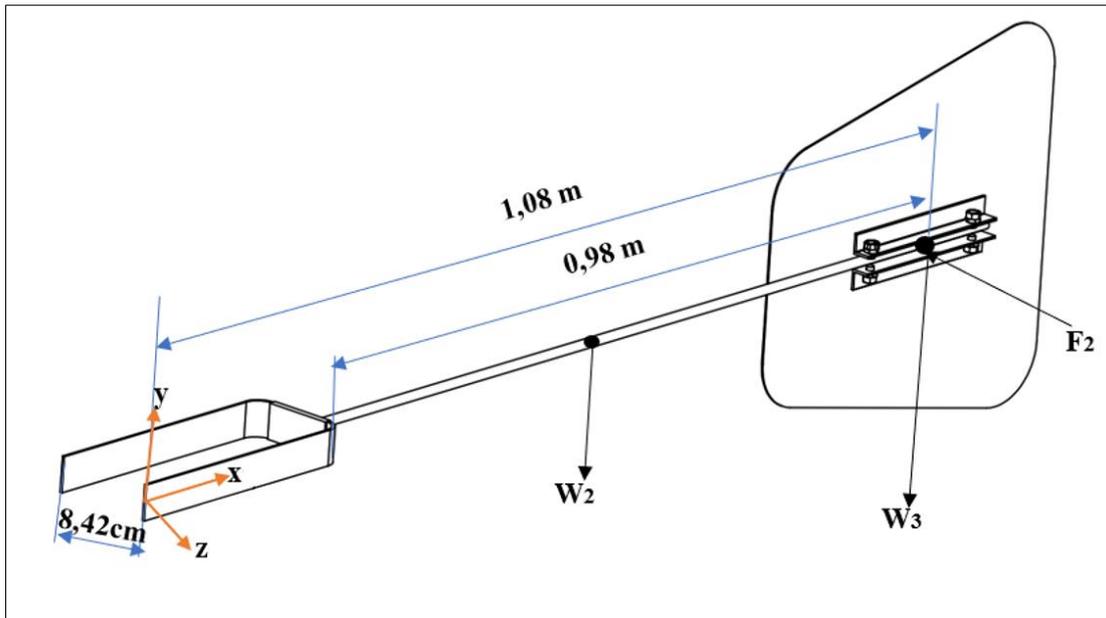


Figura 29. Esquema de las cargas que intervienen en la placa rectangular.

Las cargas que actúan en la placa rectangular en el eje y (W_2 y W_3) generan un momento M_z y la carga del viento F_{D2max} , genera un momento M_y como se muestra en la **Figura 30**. Las cargas al actuar de manera simultánea generan un momento flector máximo en dirección del ángulo α .

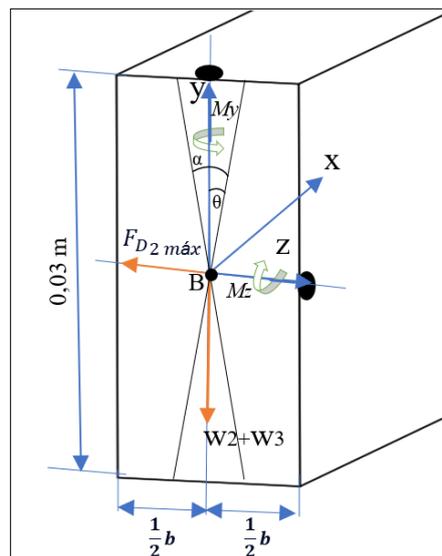


Figura 30. Diagrama de la sección de la placa rectangular, con los ejes x, y, z en dirección positiva.

Calculando los momentos con respecto al punto B se tiene.

Para cargas hacia el eje y, se obtiene un Momento denominado M_z .

$$\Sigma M_B = 0$$

$$\left(\frac{W_2}{2} \times 0,59 \text{ m}\right) + \left(\frac{W_3}{2} \times 1,08 \text{ m}\right) = M_z$$

$$(1,90 \text{ N} \times 0,59 \text{ m}) + (3,58 \text{ N} * 1,08 \text{ m}) = M_z$$

$$M_z = 4,99 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Para la carga hacia el eje z, se obtiene un Momento denominado M_y .

$$\Sigma M_B = 0$$

$$(F_{D_2 \text{ máx}} \times 1,08 \text{ m}) = M_y$$

$$(0,4048 \text{ N} \times 1,08 \text{ m}) = M_y$$

$$M_z = 0,44 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Luego se obtiene el valor del ángulo α aplicando la Ecuación (21).

$$\theta = \tan^{-1} \frac{M_y}{M_z}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{0,44 \text{ N} \cdot \text{m}}{4,99 \text{ N} \cdot \text{m}} \right) = 5,04^\circ$$

En la figura se aprecia el ángulo θ y la sección "x", la cual corresponde al espesor que se debe validar.

$$\alpha = 2\theta = 10,08^\circ$$

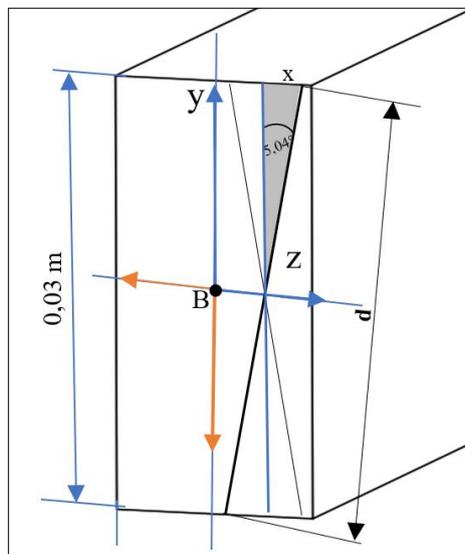


Figura 31. Ángulo y sección presentes en el diagrama de placa rectangular.

El valor d^4 se obtiene aplicando la siguiente relación trigonométrica.

$$\tan(5,04^\circ) = \frac{x}{15 \text{ mm}}$$

$$x = \tan(5,04^\circ) \times 15 \text{ mm}$$

$$x = 1,32 \text{ mm}$$

Con teorema de Pitágoras se obtiene d .

$$d = 2 \times \sqrt{(1,32 \text{ mm})^2 + (15 \text{ mm})^2}$$

$$d = 30,12 \text{ mm} = 0,03012 \text{ m}$$

Luego se obtiene el valor correspondiente al momento de inercia se obtiene aplicando la Ecuación (22)

$$I_{\alpha} = \frac{d^4 \times \text{sen}^3 \alpha}{48}$$

$$I_{\alpha} = \frac{(0,03012 \text{ m})^4 \times \text{sen}^3 (10,08^{\circ})}{48}$$

$$I_{\alpha} = 9,1932 \times 10^{-11} \text{ m}^4$$

Finalmente aplicando la Ecuación (23) se determina que el esfuerzo máximo de flexión del material debe ser mayor o igual al esfuerzo de flexión por la carga.

$$\sigma_{Mf} \geq \frac{M_f \times c \times n_s}{I_z}$$

Para el valor c , se aplica el valor mínimo correspondiente al espesor de la pletina de 3 mm y un valor para σ_{Mf} de 250 Mpa, ver **Anexo 12..**

$$250 * 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \geq \frac{5,01 \text{ N} \cdot \text{m} \times 0,0015 \text{ m} \times 2,35}{9,1932 \times 10^{-11} \text{ m}^4}$$

$$250 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \geq 192,10 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Finalmente se comprueba que el espesor de 0,003 m correspondiente a la pletina utilizada en el eje, sí soporta las cargas aplicadas.

5.3.1.4.6 Elemento de giro del sistema de enfriamiento.

En la **Figura 32** la parte del elemento que cumple la función de hacer girar el captador de aire en dirección perpendicular al viento.

El componente propuesto incluye una manzana (buje) de longitud de 13,5 cm cuyo eje tiene un diámetro de 3/8". Este componente es adaptado a una sección de tubo de acero sobre los cuales ingresa el caudal de aire.

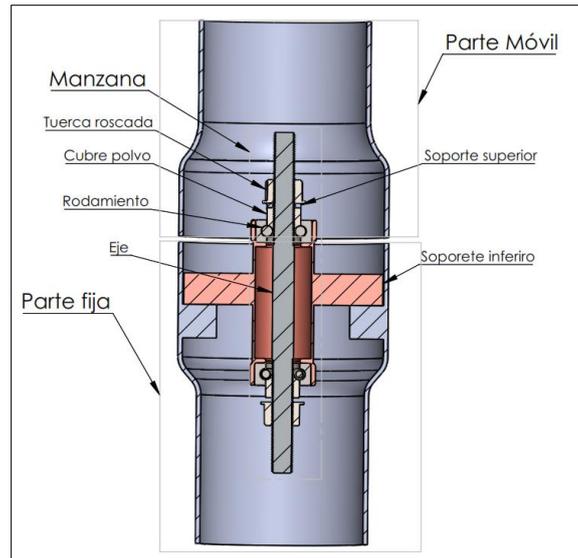


Figura 32. Elemento de giro del sistema de enfriamiento.

La sección de la tubería en el tramo donde se introduce la manzana tiene un diámetro de 3,5”

5.3.2 Segundo Objetivo

5.3.2.1 Planteamiento de un prototipo de prueba.

Para la construcción de prototipo de prueba, se construye cada uno de los componentes diseñados, según las características y dimensiones previamente determinadas, los componentes construidos se aprecian en la **Tabla 18**.

Tabla 18. Elementos que conforman el sistema de enfriamiento mediante corriente de aire.

Componente	Características	Funcionamiento.
Captador de corriente de aire. 	Diámetro de entrada 0,7 m Diámetro de salida 0,076 m Material. - Lámina galvanizada de 0,5mm	Capta la corriente de aire. La función principal es elevar la velocidad natural del viento
Veleta. 	Área: 0,086 m ² Material. - Lámina galvanizada 0,5 mm	Orientar el captador de corriente de aire en dirección del viento.

Componente	Características	Funcionamiento.
<p>Base del sistema.</p> 	<p>Componentes. Platinas de 3 cm por ¼ de pulgada de espesor. - 4 elementos de 1,20 m de longitud. 4 elementos de 0,6 m de longitud. 4 tacos y tornillos para empotrar.</p>	<p>Mantiene fijo el elemento giratorio del sistema Es el soporte del sistema de enfriamiento,</p>
<p>Eje de veleta.</p> 	<p>Longitud 1,08 m. Material: Varilla corrugada</p>	<p>Une la veleta con el captador de aire</p>
<p>Elemento giratorio.</p> 	<p>Elemento giratorio. 1 manzana de Hierro. 2 tubos de acero de 3 pulgadas de diámetro. 2 tubos de acero de 3,5 pulgadas de diámetro</p>	<p>La función principal de este componente es unir la parte fija con la parte móvil del sistema de enfriamiento. Facilita la orientación del captador de corriente de aire en dirección del viento</p>
<p>Tubo PVC</p> 	<p>Tubo PVC Longitud 3 m Diámetro: 3"</p>	<p>Se utilizaron como ductos para llevar el aire hacia los paneles solares</p>
<p>Boquilla</p> 	<p>Boquilla del sistema de enfriamiento.</p>	<p>Este componente del sistema abarca toda la longitud del panel</p>

5.3.3 Tercer Objetivo

5.3.3.1 Evaluación de la eficacia del sistema.

Para la evaluar el sistema de enfriamiento se realizaron mediciones de temperaturas en las superficies de los paneles solares, la temperatura ambiente y las velocidades del viento a la entrada del sistema de enfriamiento y a la salida.

Las mediciones se realizaron en la Ciudad de Loja, ciudadela Electricista- Alto y en la ciudad de Catamayo, sector Trapecillo – Alto. Las tablas de datos se pueden observar en el **Anexo 13**, tablas de datos a), b) y c). En la sección de resultados se muestran gráficas para cada día de mediciones realizadas.

Finalmente se realiza mediciones el día 1 de septiembre, incluyendo datos de la radiación solar, con la finalidad de calcular las potencias teóricas del panel solar con enfriamiento y sin enfriamiento. En el **Anexo 14** se muestran los cálculos obtenidos para la potencia del panel solar considerando el coeficiente de temperatura de potencia máxima el cual se indica en el **Anexo 13**.

A partir de los datos medidos, de **Anexo 13 d)**, mediciones del 1 de septiembre se calcula las potencias máximas generadas para el panel solar con enfriamiento (P_{P1}) y sin enfriamiento (P_{P2}), aplicando la **Ecuación (26)**. Aplicando las **Ecuaciones (24) y (25)** se obtiene las Temperaturas de celda solar ($T_{c_Calculada}$), mediante la cual se puede evaluar con la temperatura del panel solar sin enfriamiento ($T_{4_P2_Inf}$) y así se obtiene el porcentaje de error para cada medición realizada, cuyo valor promedio es de 4,74 %.

5.3.3.2 Análisis de costos del sistema de enfriamiento construido.

Los costos de los materiales para la construcción del sistema de enfriamiento se muestran en la **Tabla 19**, cada uno de los componentes utilizados, medidas y otros detalles se describen en el Anexo 7, así también se indica el proceso de construcción y costo de cada tarea realizada.

Tabla 19. Costos de materiales y construcción del sistema de enfriamiento.

Descripción	Costo (USD)
Materiales y elementos	200,17
Proceso de construcción.	64,0
Total	264,17

6. Resultados.

6.1 Diseño de elementos del sistema.

Los elementos del sistema de enfriamiento fueron diseñados con base en la metodología planteada, obteniendo así los planos finales para su construcción, presentados en **Anexo 16**.

En la **Figura 33**, se presenta la simulación del flujo de corriente de aire realizada en SolidWorks, por método de los volúmenes finitos.

Para la entrada de la corriente de aire se estableció una velocidad constante de 2,5 m/s sobre la sección del captador de corriente de aire de 0,38 m² considerando condiciones de flujo laminar y turbulento. Para modelar las condiciones térmicas se asumió un comportamiento adiabático en las paredes del sistema. En la salida del sistema, se aplicaron condiciones de frontera que reflejan el área de salida de la boquilla de 0,0066 m², la temperatura promedio del lugar de estudio de 21,96 °C y la presión atmosférica.

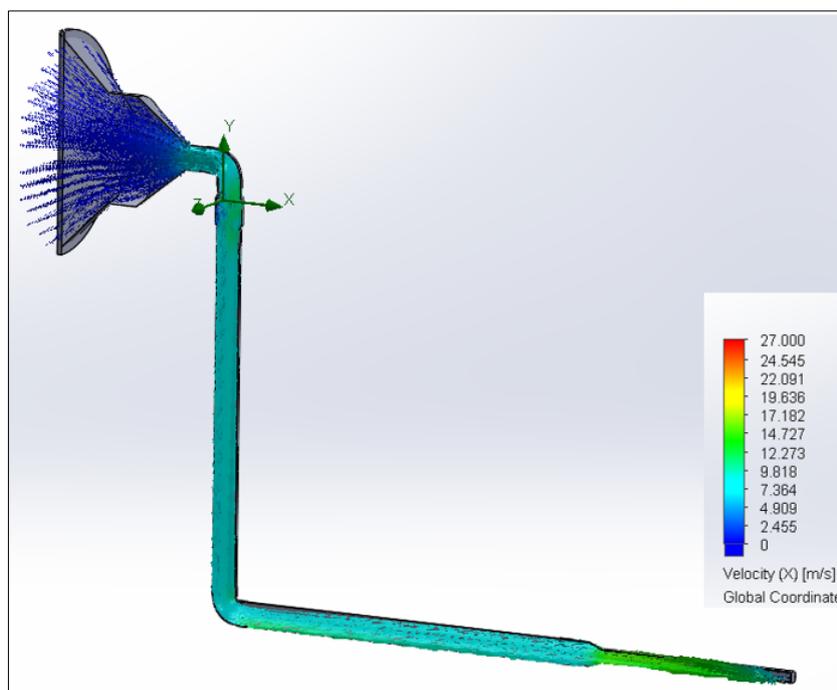


Figura 33. Simulación de la circulación de aire por los ductos del sistema de enfriamiento

Con base en los parámetros de funcionamiento de los componentes del sistema, se planteó el prototipo de prueba con todos sus componentes diseñados. En la **Figura 34** se muestra la gráfica del sistema de enfriamiento propuesto.



Figura 34. Sistema de enfriamiento propuesto realizado en Software.

6.2 Construcción de los componentes del sistema.

Con los planos obtenidos en la sección anterior se procede a construir cada uno de los componentes del sistema de enfriamiento propuesto.

Para la construcción del elemento giratorio, fue necesario adquirir un buje para eje de bicicletas (manzana), el cual fue adaptado al sistema, en el plano del conjunto presentado en el **Anexo 16**, se describe este componente.

El elemento que capta la corriente de aire denominado sistema de captación de corriente de aire, como se había detallado en la sección de Procesamiento y Análisis de datos, se realizaron experimentaciones previas para obtener su geometría final.

Las dimensiones y especificaciones para la construcción de los componentes se muestran en los planos presentados.

Luego de construir todos los elementos que intervienen en el prototipo se, realiza el ensamblaje del mismo, ver **Figura 35**.



Figura 35. Sistema de enfriamiento para superficie de panel fotovoltaico construido.

6.3 Validación del sistema.

En la **Figura 36** y **Figura 37** se observa las gráficas obtenidas de mediciones de temperaturas y voltajes respectivamente, realizadas el 25 de julio del 2023 en el sector Trapichillo Alto del cantón Catamayo, se obtiene los siguientes datos.

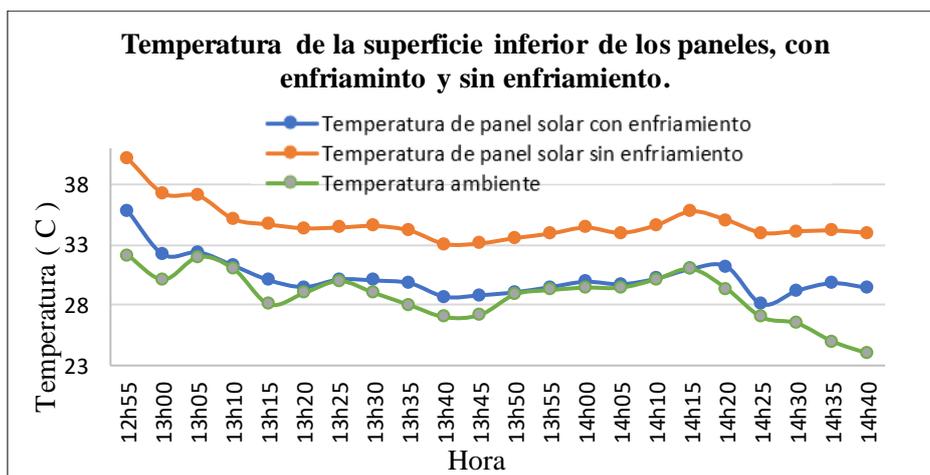


Figura 36. Curvas de temperaturas, mediciones 25 de julio de 2023, Trapichillo-Catamayo.

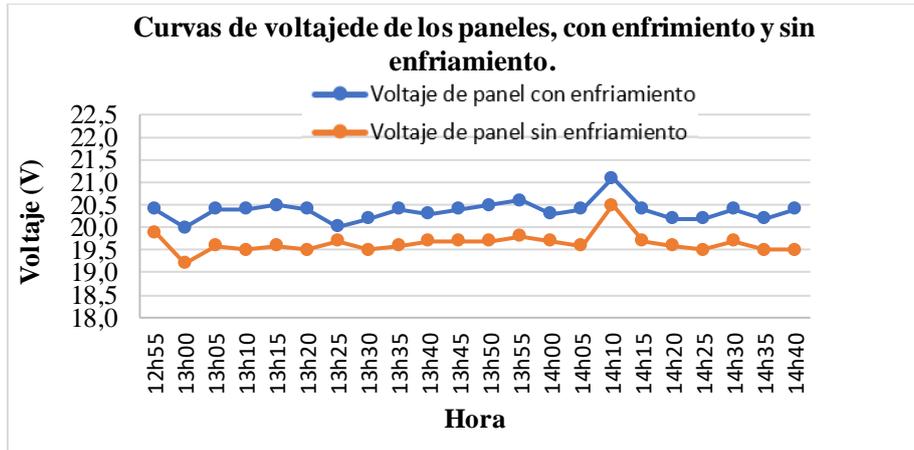


Figura 37. Curvas de voltaje, mediciones 25 de julio de 2023.

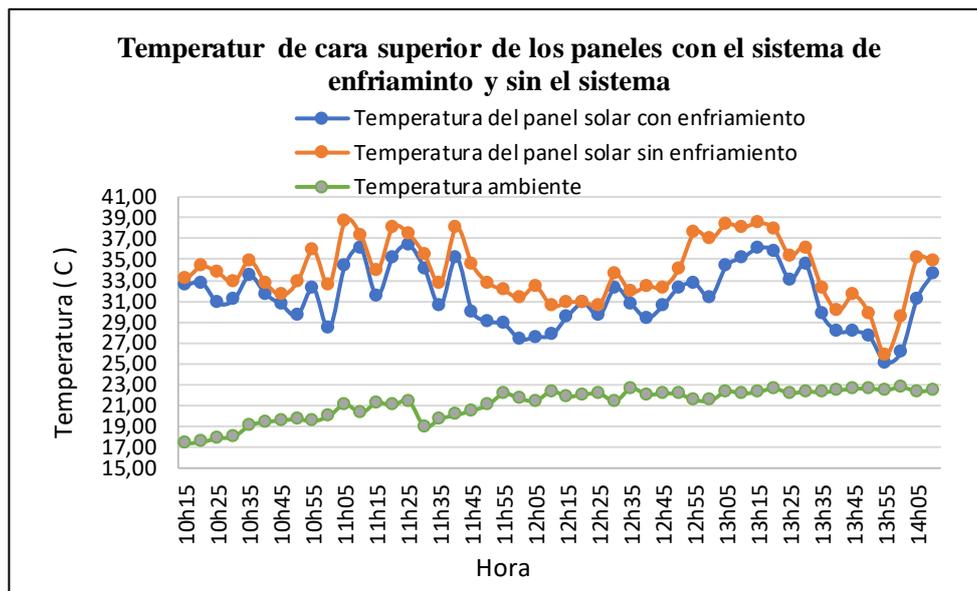


Figura 38. Curvas de temperaturas, mediciones 26 de julio de 2023, Electricista Alto – Loja

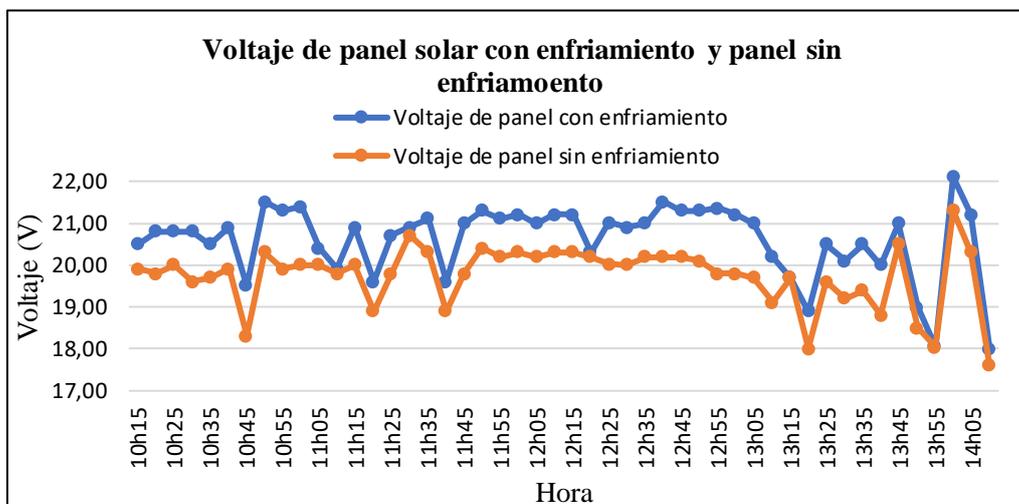


Figura 39. Curvas de voltaje, mediciones 26 de julio de 2023, Electricista Alto – Loja.

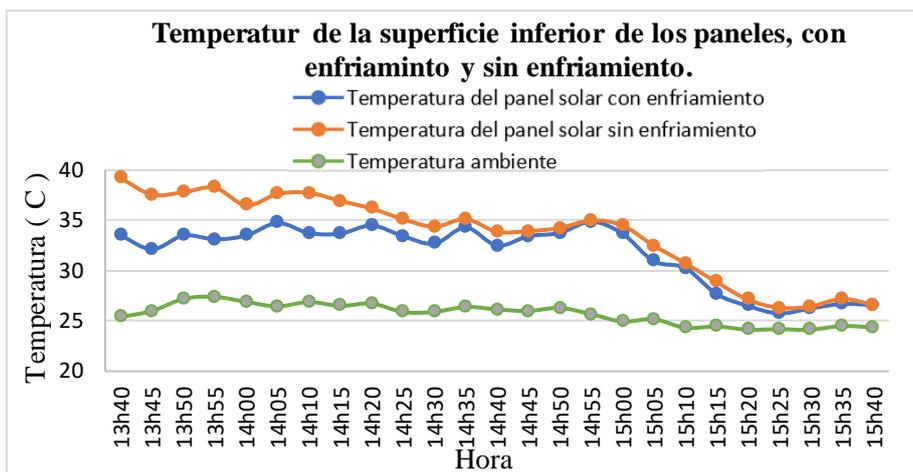


Figura 40. Curvas de temperaturas, mediciones 29 de julio de 2023, Trapichuillo-Catamayo

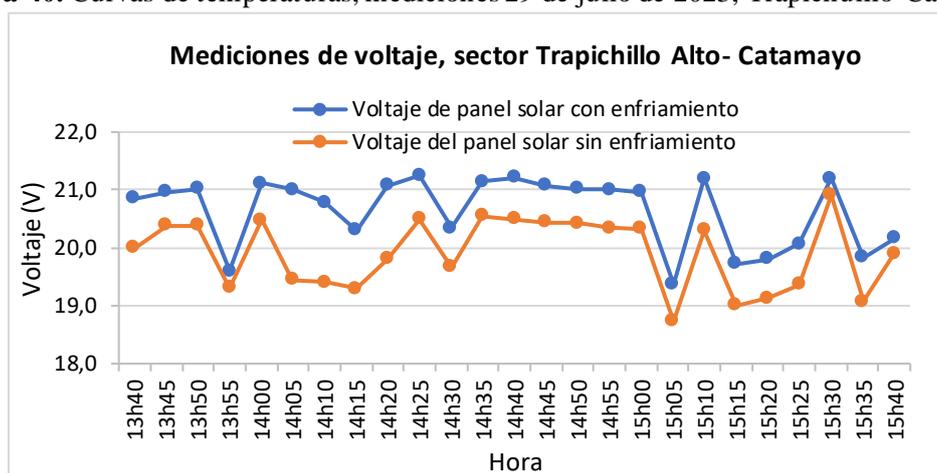


Figura 41. Curvas de voltaje, mediciones 29 de julio de 2023.

De las mediciones realizadas el día 01 de septiembre del 2023 en la ciudad de Loja, se obtiene la **Figura 42**, donde se muestra la temperatura teórica calculada con Método de Mattei, temperatura medida del panel solar con enfriamiento y temperatura del panel sin enfriamiento respectivamente.

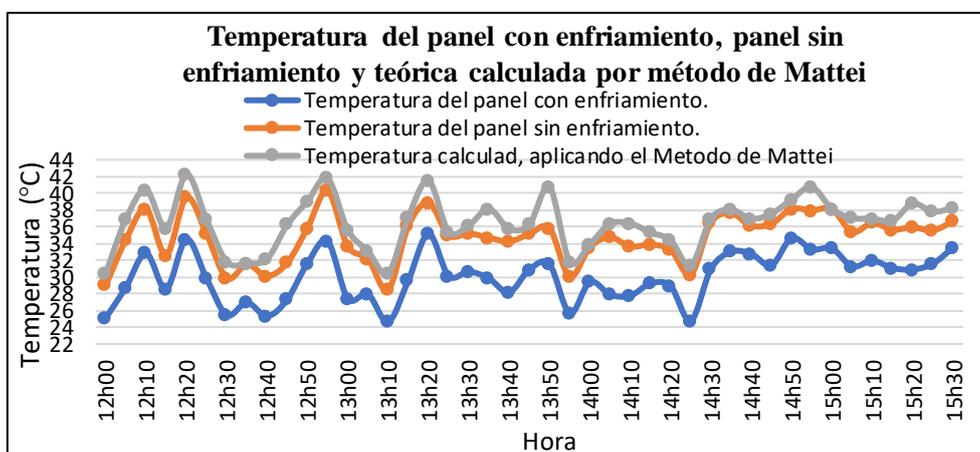


Figura 42. Curva de temperaturas, mediciones 01 de septiembre del 2023.

Con los datos obtenidos el 1 de septiembre, se presentan las velocidades del viento en el ambiente y a la salida del sistema de enfriamiento respectivamente.

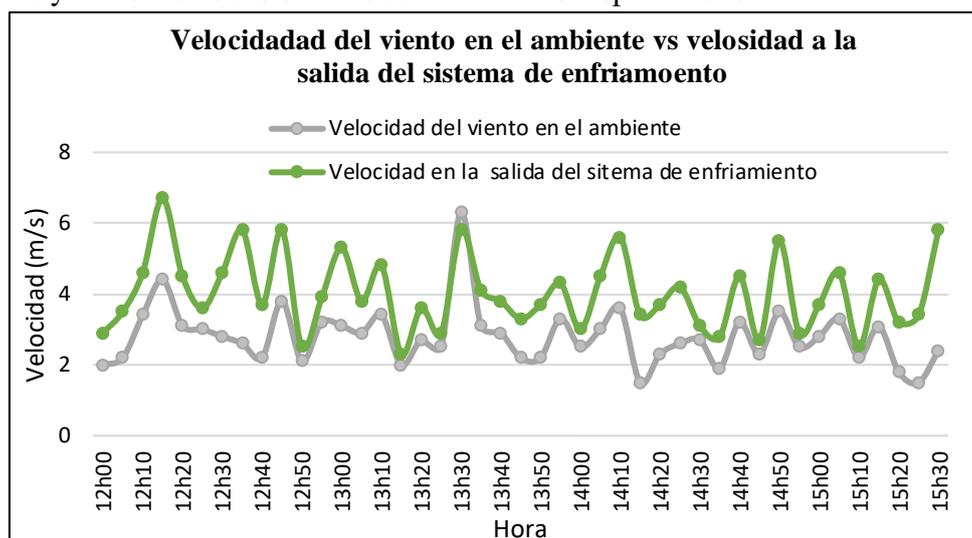


Figura 43. Curvas de velocidades del viento al ambiente y salida del sistema de enfriamiento.

Finalmente, en la **Tabla 20** se muestran los resultados finales para cada día de las mediciones realizadas, indicando las variaciones de temperatura alcanzada (ΔT) y el aumento de la velocidad que se obtuvo (ΔV_v) y en la **Tabla 20** se muestran los valores correspondientes a las potencias máximas calculadas con las temperaturas de celdas de cada panel fotovoltaico, para el panel con enfriamiento (P1) y sin enfriamiento (P2),

Tabla 20. Resultados presentados por día de las mediciones realizadas.

RESULTADOS DE MEDICIONES REALIZADAS							
Ubicación	Fecha	Temperatura P1 (°C)	Temperatura P2 (°C)	ΔT (°C)	$V_{ambiente}$ (m/s)	V_{salida} (m/s)	V_v
Trapichillo Alto-Catamayo	25/7/2023	30,26	34,84	4,58	2,04	3,43	68%
Electricista Alto-Loja	26/7/2023	31,16	33,85	2,69	1,97	3,21	63%
Trapichillo Alto-Catamayo	29/7/2023	29,83	34,30	4,47	2,42	4,56	88%
Electricista Alto-Loja	2/9/2023	29,79	35,39	5,6	2,2	4,03	83%

Tabla 21. Potencias máximas calculadas para panel los paneles P1 y P2

RESULTADOS DE POTENCIAS MÁXIMAS CALCULADAS, MEDICIONES 01/09/2023						
Ubicación	Potencia-P1 (W)	Potencia-P2 (W)	ΔP %	Temperatura-P2 (°C)	$T_{calculada}$ (°C)	% Error
Electricista Alto - Loja	33,49	32,87	1,87%	34,72	36,47	4,74

7. Discusión

El diseño de un sistema de enfriamiento superficial de paneles fotovoltaicos mediante corriente de aire, se basa en el aprovechamiento del recurso eólico, con la finalidad de mejorar el rendimiento de un panel fotovoltaico reduciendo la temperatura de funcionamiento. En el sistema se utilizó elementos como la captación de la corriente de aire con fines de elevar la velocidad del viento y canalizarla hacia la superficie a ser enfriada. Es esencial señalar que la eficacia del prototipo del sistema de enfriamiento propuesto se encuentra intrínsecamente ligada a la disponibilidad del recurso eólico en la ubicación donde se desee implementar el sistema de enfriamiento

Para alcanzar el primer objetivo planteado, se seleccionó dos paneles fotovoltaicos para el estudio, con las mismas características técnicas, luego se identificó las condiciones de funcionamiento del sistema, partiendo de un balance energético en el panel solar de estudio. Para este procedimiento se aplicó los fundamentos teóricos de transferencia de calor de (Cengel & Ghajar, 2011) y mediante investigación bibliográfica de transferencia de calor en placas inclinadas de (Fujii & Imura, 1970) se aplicó las correlaciones adecuadas para los cálculos. Con la información meteorológica del lugar de estudio presentadas por INAMHI 2018, se determina las condiciones de operación, con velocidad del viento a la salida del sistema de 3 m/s y el área planteada, con ello se determinó un flujo másico de $0,024 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ de aire.

Este primer objetivo se concretó con el diseño de cada uno de los componentes del sistema de enfriamiento, realizando estudios de resistencia de materiales con métodos de cálculo presentadas en (Pisarenko., n.d.,1979) y (Budynas & Keith Nisbett, 2012). La geometría de algunos componentes fue planteada con base en simulaciones de fluidos mediante Software CAD.

Para la construcción del sistema de enfriamiento, el cual corresponde al segundo objetivo de la investigación, en esta etapa se identifica y selecciona los materiales adecuados, considerando las condiciones ambientales a las cuales estarán expuestos estos componentes. El sistema de enfriamiento propuesto se ha clasificado en 3 componentes principales; El sistema de captación de corriente de aire, los ductos que conducen la corriente de aire hacia la superficie del panel solar y una base o soporte del sistema, cada elemento fue construido con base en los diseños planteados en el primer objetivo.

En el tercer objetivo de la investigación se valida el sistema de enfriamiento construido. Este procedimiento se lleva a cabo realizando la comparación de datos entre dos paneles solares para ello se realizaron mediciones de temperaturas en las superficies del panel solar con el

sistema de enfriamiento y el panel sin enfriamiento, los equipos utilizados y las características técnicas fueron considerados con base en la norma (IEC, 2016), los paneles fotovoltaicos operaban bajo las mismas condiciones, sin conexión a cargas.

Según experimentaciones realizadas por (Almuwailhi & Zeitoun, 2021) aplicando la tecnología de refrigeración para paneles solares mediante convección forzada con ventiladores, logró una reducción de temperatura promedio de 6,4 °C. Con el prototipo planteado en la presente investigación, con base en los datos obtenidas se logró disminuir la temperatura de la superficie del panel en promedio 4,34 °C, considerándose una variación de temperatura inferior a las obtenidas por la investigación indicada anteriormente cuenta con la ventaja del funcionamiento sin consumo adicional de energía, mejorando así la eficiencia global del sistema.

Adicionalmente se obtiene las Potencias máximas de generación utilizando el coeficiente de temperatura de potencia máxima dado por el fabricante y con las temperaturas de celda medidas, aplicando este procedimiento se logra obtener el mejoramiento de la potencia del panel solar enfriado respecto al que no utiliza el sistema de enfriamiento. Esta metodología fue validada al realizar una comparación entre la temperatura de celda calculada con la temperatura medida aplicando el método de (Mattei et al., 2006), obteniendo así una precisión del 95,26%. La potencia mejorada del panel fotovoltaico con enfriamiento es del 1,87% con respecto al panel fotovoltaico sin enfriamiento.

8. Conclusiones.

Se diseñó un sistema de enfriamiento superficial para paneles fotovoltaicos mediante corriente de aire, con mecanismo de orientación hacia el flujo de corriente de aire, cuyo flujo másico es de $0,024 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ para una velocidad de salida del viento de $3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

El prototipo de prueba planteado cuenta con un captador de corriente de aire que se posiciona en la dirección del viento mediante un elemento de orientación tipo veleta. Así mismo cuenta con un eje de giro de este dispositivo, cuyo elemento es adaptado del componente conocido como manzana, contribuyendo positivamente a la receptividad del giro del sistema.

Mediante la evaluación del prototipo de prueba, se realizaron mediciones de temperatura, sobre las superficies superiores e inferiores de los paneles solares y se logró determinar la diferencia de temperatura promedio $4,34 \text{ }^\circ\text{C}$, siendo esta la ventaja favorable para el panel fotovoltaico con el sistema de enfriamiento en relación al panel que no contaba con este sistema.

De las mediciones de velocidades del viento del ambiente y a la salida del sistema de enfriamiento, se logró aumentar la velocidad en un máximo de 88% y con los cálculos de potencias máximas se determinó el mejoramiento de la potencia calculada del 1,87% en relación al panel fotovoltaico sin enfriamiento.

9. Recomendaciones

Es importante mejorar el diseño del componente denominado captador de corriente de aire, para elevar la velocidad de salida del viento, esto elevará considerablemente el coeficiente de transferencia de calor por convección en la superficie del panel fotovoltaico.

Se recomienda realizar un estudio previo acerca de la disponibilidad del recurso eólico del lugar donde se desea implementar el sistema de enfriamiento, ya que la eficacia del sistema depende intrínsecamente de este factor.

Para obtener valores con mayor precisión en los cálculos del mejoramiento del rendimiento del panel fotovoltaico con el sistema de enfriamiento, se recomienda realizar mediciones cuando estos estén conectados a carga máxima de funcionamiento.

Se recomienda realizar un estudio para mejorar la capacidad de respuesta de la veleta, frente a variaciones de la dirección del flujo de aire, con la finalidad de lograr cambios en la dirección del viento de manera más rápida y precisa, contribuyendo así en una mejora sustancial en el desempeño global del sistema.

10. Bibliografía

- Almuwailhi, A., & Zeitoun, O. (2021). Investigating the cooling of solar photovoltaic modules under the conditions of Riyadh. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.03.007>
- Álvarez O, Maldonado, ;, Montaña, ;, & Tenechagua, ; (2014). Análisis Climático de la Velocidad del Viento en la Región Sur del Ecuador. In *Revista Politécnica-Julio* (Vol. 35, Issue 3).
- Bahaidarah, H., Subhan, A., Gandhidasan, P., & Rehman, S. (2013). Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions. *Energy*, 59, 445–453. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.07.050>
- Battioni, M., Risso, G., Cutrera, M., & Schmidt, J. (2016). Evaluación de distintos métodos para estimar la temperatura de operación de módulos fotovoltaicos y estimación de las pérdidas de energía por efecto de la temperatura. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 20, 4.
- Blas Martínez Director, D., & Ángel Torres, M. (2011). *Instalaciones de paneles fotovoltaicos en Bosal S.A.*
- Budynas, R. G., & Keith Nisbett, J. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, 9na Edición*. 2012.
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de Calor y Masa - Fundamentos y aplicaciones*. (Cuarta edición.).
- Elminshawy, N. A. S., El Ghandour, M., Gad, H. M., El-Damhogi, D. G., El-Nahhas, K., & Addas, M. F. (2019). The performance of a buried heat exchanger system for PV panel cooling under elevated air temperatures. *Geothermics*, 82, 7–15. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.05.012>
- Empresa ADELCA CA. (2020). Empresa Adelca. <https://www.adelca.com/producto.php?nom=VARILLA%20RECTA&cat=>
- Flores, N., Domínguez, M., & Ramírez Bon, R. (2014). “Medición de la eficiencia energética de los paneles solares de silicio.”
- Fujii, T., & Imura, H. (1970). *Natural-Convection heat transfer from a plate with arbitrary inclination*.
- Garrido, J. (2020). *Estudio de la influencia del ensuciamiento por polvo en la temperatura de un panel fotovoltaico mediante un modelo computacional unidimensional*.

- Gupta, S. K., & Pradhan, S. (2021). A review of recent advances and the role of nanofluid in solar photovoltaic thermal (PV/T) system. *Materials Today: Proceedings*, 44, 782–791. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.708>
- Herrera, R. (2013). *Modelado y caracterización de los paneles fotovoltaicos*.
- IEC. (2016). *International Electrotechnical Commission- IEC-61215*.
- Kenneth S, E., & Mckee, Robert. (1992). *Fundamentals of Mechanical Component Design* (J. Wiley, Ed.).
- Kreith, F., Manglik, R. M., & Bohn, M. S. (2012). *Principios de Transferencia de calor* (S. R. Cervantes & O. Ramírez, Eds.; Séptima edición).
- Kurtz, S., Whitfield, K., Miller, D., Joyce, J., Wohlgemuth, J., Kempe, M., Dhere, N., Bosco, N., & Zgonena, T. (2009). Evaluation of high-temperature exposure of rack-mounted photovoltaic modules. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 002399–002404. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2009.5411307>
- Linares, F. (2020). *Efecto de la temperatura en paneles solares fotovoltaicos y tecnologías de refrigeración para el mejoramiento de la eficiencia*. 1–80.
- Linares, F. (2022). *Efecto de la temperatura en paneles solares fotovoltaicos y tecnologías de refrigeración para el mejoramiento de la eficiencia*.
- Maleki, A., Haghghi, A., El Haj Assad, M., Mahariq, I., & Alhuyi Nazari, M. (2020). A review on the approaches employed for cooling PV cells. In *Solar Energy* (Vol. 209, pp. 170–185). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.083>
- Markvart, T. (2000). *Solar electricity 2nd edition* (J. Wiley, Ed.; Segunda Edición). 2000.
- Martínez, D. (2010). *Instalación de Paneles Fotovoltaicos en Bosal S.A.* Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza.
- Mattei, M., Notton, G., Cristofari, G., Muselli, M., & Poggi, P. (2006). *Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance*.
- Mazón-Hernández, R., García-Cascales, J. R., Vera-García, F., Káiser, A. S., & Zamora, B. (2013). Improving the electrical parameters of a photovoltaic panel by means of an induced or forced air stream. *International Journal of Photoenergy*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/830968>
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos*.
- NAP, G. (2007). *Energía solar fotovoltaica*. Colegio Oficial Ingenieros de Telecomunicación.
- Perpiñán Lamigueiro, O., Colmenar Santos, A., & Castro Gil, M.-A. (2012). *Diseño de sistemas fotovoltaicos*. PROGNSA.

- Pisarenko, G., Yákovlev, A., & Matvéev, V. (1979). *Manual de Resistencia de materiales. Pisarenko.*
- REIPROACERO SA. (2022). *Reiproacero - Importadora de productos de acero.*
<https://reiproacero.ec/m/productos/>
- Román, J., & Villacrés, K. (2014). *Metodología para la Evaluación del Recurso Eólico.*
- Sajjad, U., Amer, M., Ali, H. M., Dahiya, A., & Abbas, N. (2019). Cost effective cooling of photovoltaic modules to improve efficiency. *Case Studies in Thermal Engineering, 14.*
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100420>
- Tonui, J. K., & Tripanagnostopoulos, Y. (2007). Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements. *Solar Energy, 81(4)*, 498–511.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.08.002>
- Vallejo, D., & Salazar, Á. (2011). “*Diseño y construcción de un sistema solar térmico para calentamiento de agua mediante proceso de termosifón para una vivienda rural sostenible de interés social del AEIRNNR.*” UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA.
- Yunus A., Ç. (2013). Transferencia de Calor y Masa. *Journal of Chemical Information and Modeling, 1(9)*, 1699.
- Zhou, J., Yi, Q., Wang, Y., & Ye, Z. (2015). Temperature distribution of photovoltaic module based on finite element simulation. *Solar Energy, 111*, 97–103.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.10.040>

11. Anexos

Anexo 1. Criterios de evaluación para selección de paneles solares de estudio.

1. Criterios de evaluación para elegir el tipo de panel solar fotovoltaico para su estudio.

1= Conveniente 2= Poco conveniente 3= menos conveniente		Monocrystalino	Policristalino	Amorfo
CRITERIOS DE EVALUCION	Eficiencia	1	2	3
	Resistencia térmica	1	1	3
	Durabilidad	1	1	2
	Disponibilidad	1	1	2
	Tamaño	2	1	3
	Costo	3	2	1
	Potencias	1	1	3
	TOTAL	10	9	17

2. Alternativas de paneles solares policristalinos.

Tipo	Marca	Serie	Rendimiento	Potencias disponibles
Policristalino	Kyocera	KC; KC; GHT2	14 a 16%	40, 50, 65, 85, 130, 175, 200.
	Powest	SZYL	14,1 a 16,5%	30,50,100,150, 280, 345.
	Connera	ASTRAL-II	16 a 16,5%	265, 270, 275,280, 325, 330,335

3. Selección de la mejor alternativa.

1= Conveniente 2= Poco conveniente 3= menos conveniente		Kyocera	Powest	Connera
CRITERIOS DE EVALUCION	Eficiencia	1	1	1
	Resistencia térmica	1	1	1
	Durabilidad	1	1	1
	Disponibilidad	2	1	2
	Tamaño	1	1	3
	Costo	2	1	3
	Potencias	1	1	3
	TOTAL	9	7	14

4. Selección de la potencia del panel.

1= Conveniente 2= Poco conveniente 3= menos conveniente		30 W	50 W	100W	150W	280W	345W
CRITERIOS DE EVALUCION	Eficiencia	3	3	2	1	1	1
	Resistencia térmica	1	1	1	1	1	1
	Durabilidad	1	1	1	1	1	1
	Disponibilidad	1	1	1	1	1	1
	Tamaño	2	1	2	2	3	3
	Costo	1	1	2	2	3	3
	TOTAL	9	8	9	8	10	10

Como mejor opción en función de los criterios de evaluación establecidos se tiene:

POLICRISTALINO – POWEST SZYL 50 W

Anexo 2. Tabla de valores de mediciones realizadas, de temperaturas del panel placa inferior, placa superior y temperatura ambiente.

Mediciones de temperaturas realizadas el 05 de Julio del 2023 (°C).			
Hora.	T. ambiente (T_{∞})	T. Superficie inferior ($T_{inf.}$)	T. superficie superior ($T_{sup.}$)
10h45	20	26	29
10h50	22	28	29
10h55	25	31	35
11h00	25	29	32
11h05	25	30	31
11h10	24	28	31
11h15	24	30	30
11h20	24	29	29
11h25	24	30	30
11h30	26	30	31
11h35	26	37	39
11h40	26	33	33
11h45	26	30	31
11h50	25	29	30
11h55	25	28	28
12h00	26	32	33
T. Máxima	26	37	39
T. Mínima	20	26	28
T. Media	24,56	30,00	31,31

Anexo 3. Especificaciones técnicas del panel solar.

- Placa del panel solar fotovoltaico.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
Tipo de módulo	Poli-Cristalino
Potencia máxima	50W
Tolerancia salida de potencia	0 /+5%
Voltaje de circuito abierto	22.5VDC
Corriente de cortocircuito	2.86A
Voltaje en potencia máxima	18.7VDC
Corriente en potencia máxima	2.68A
Eficiencia	14.1%
Max. serie de fusible	10A
Caja de conexiones (grado de protección)	> IP65
Máxima tensión del sistema	1000VDC
Rango de temperatura de funcionamiento	-40°C to 85°C
Peso	4.3kg
Celda (cantidad / material / número de barras colectoras)	36 / silicio multicristalino / 4 o 5
Dimensiones (Altura*Ancho*Profundidad)	660mm/540mm/30mm
Calificaciones y certificado	IEC 61215, IEC 61730, CE, ISO 9001:2015, ISO 14001:2015, BS OHSAS 18001:2007, SA 8000:2015

*STC: Irradiación de 1000 W / m2, temperatura del módulo de 25 ° C, espectro AM1.5g según EN 60904-3.
Reducción de eficiencia relativa promedio de 3.3% a 200W / m 2 según EN 60904-1."

Consulte el número de serie en la parte frontal del módulo. Clasificación de resistencia al fuego: Clase C

¡Advertencia! Lea el manual de instalación y operación antes de instalar, operar o dar servicio a esta unidad. No conecte contactos de enchufe. Mientras el sistema está bajo corriente de carga. ¡No seguir estas instrucciones se pone en **PELIGRO!**

Serial  220402090100419

Hecho en China

- Coeficientes de temperaturas.

Características técnicas	
Condiciones del test.	1000 W/m ² , 25 °C, AM1,5
Voltaje máximo sistema.	600 Vdc
Coefficiente de temperatura-Isc	+0,08558 % /°C
Coefficiente de temperatura-Voc	-0,29506 % /°C
Coefficiente de temperatura-Pmpp	-0,38001 % /°C
Temperatura normal trabajo célula	45 °C

Fuente: POWEST (2023)

- Ficha técnica del panel solar



POWEST

Paneles Solares Policristalinos 50W

Los paneles fotovoltaicos POWEST policristalinos son ideales para su uso en plantas de energía a gran escala, comerciales e instalaciones residenciales. Nuestros paneles fotovoltaicos están en línea con las normas de la Comisión Electro-técnica Internacional (IEC 61215, IEC 61730), e incluyen:

- Pruebas de exposición a exteriores
- Pruebas de aislamiento
- Pruebas de resistencia a puntos calientes
- Pruebas de pre acondicionamiento ultravioleta (UV)
- Pruebas de clima (como humedad-calor, ciclo térmico y humedad - congelación)
- Pruebas de carga mecánica
- Pruebas de fuga de corriente con humedad
- Pruebas de empuje
- Pruebas de impacto de granizo
- Pruebas de continuidad de conexión a tierra



Las principales características de nuestros paneles son:

- Diodo de derivación que reduce al mínimo la pérdida de potencia por la sombra
- Alta eficiencia de conversión del módulo (hasta 15,88%), gracias a una innovadora tecnología de fabricación
- Células solares de alta eficiencia con transmisión y cristal texturizado
- Vidrio templado con encapsulado EVA y película de protección frente al medio ambiente, con marco de aluminio anodizado, para una protección eficiente bajo condiciones ambientales extremas
- A prueba de agua (UL94, VO)



ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PANELES SOLARES

Tipo de módulo	Poli-Cristalino
Potencia máxima	50W
Tolerancia salida de potencia	0/+5
Voltaje de circuito abierto	22.5VDC
Corriente de cortocircuito	2.86A
Voltaje en potencia máxima	18.7VDC
Corriente en potencia máxima	2.68A
Eficiencia	14.1%
Max. serie de fusible	10A
Caja de conexiones (grado de protección)	≥ IP65
Máxima tensión del sistema	1000VDC
Rango de temperatura de funcionamiento	-40°C to 85°C
Peso	4.3kg
Celda (cantidad / material / número de barras colectoras)	36 / silicio multicristalino / 4 o 5
Dimensiones (Altura x Ancho x Profundidad)	660mm/540mm/30mm
Clase de aplicación	A
Distancia Cable	NO
Conector	NO
Calificaciones y certificado	IEC 61215, IEC 61730, CE, MCS, ISO 9001:2008, ISO 14001:2004, BS OHSAS 18001:2007, PV Cycle, SA 8000
<small>STC: irradiación de 1000 W / m², temperatura del módulo de 25 ° C, espectro AM1.5g según EN 60904-3. Reducción de eficiencia relativa promedio de 3.3% a 200W / m² según EN 60904-1.</small>	

* Sujeto a modificaciones sin previo aviso, según requerimiento del cliente, según disponibilidad de inventario y/o bajo pedido del cliente. * Fotos de referencia, accesorios se venden por separado.

Anexo 4. Propiedades del aire a diferentes temperaturas.

TABLA A-15

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., $T, ^\circ\text{C}$	Densidad, $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico, $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica, $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}^2$	Viscosidad dinámica, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-6}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1 169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

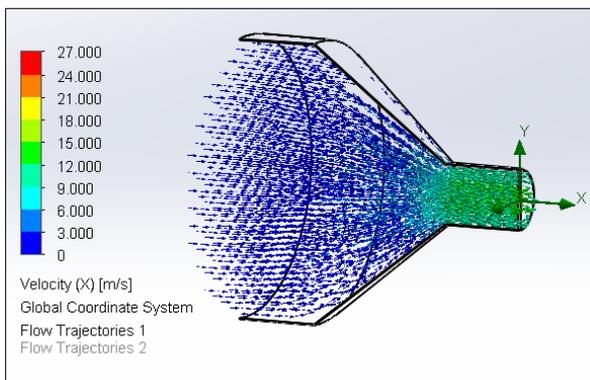
Nota: Para los gases ideales, las propiedades c_p , k , μ y Pr son independientes de la presión. Las propiedades ρ , ν y α a una presión P (en atm) diferente de 1 atm se determinan al multiplicar los valores de ρ , a la temperatura dada, por P y al dividir ν y α entre P .

Fuente: Datos generados basándose en el software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 1984, y Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena; P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

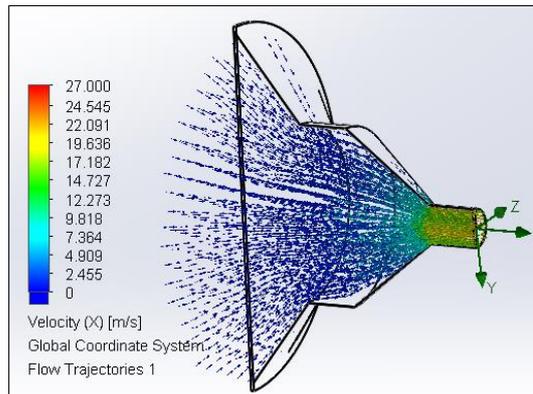
Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011)

Anexo 5. Simulaciones de corriente de aire mediante Software.

- Imágenes de simulaciones, captador de corriente de aire.

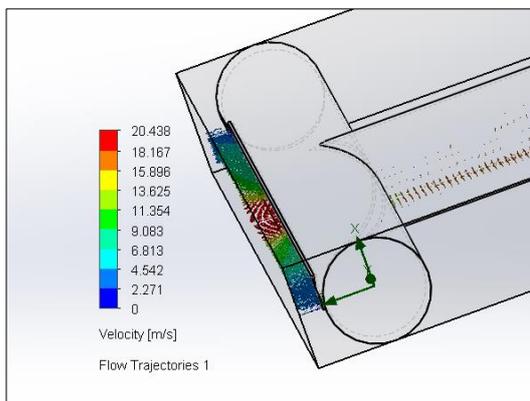


a)

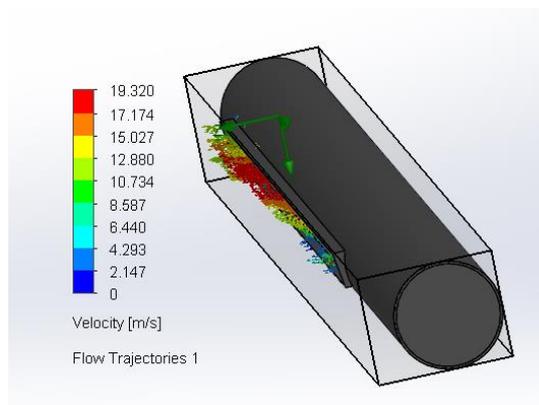


b)

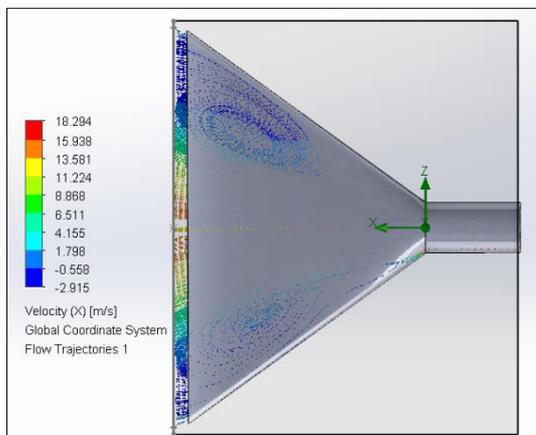
- Imágenes de simulación de formas de boquillas.



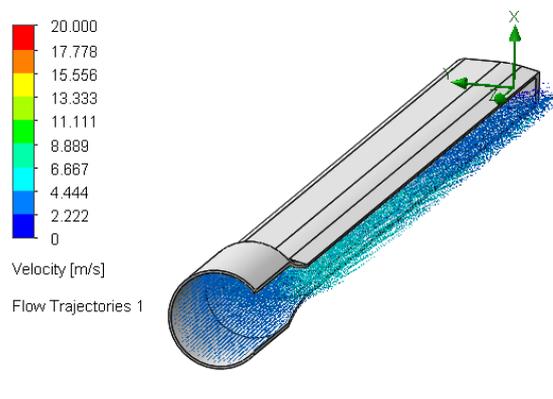
c)



d)



e)



f)

Anexo 6. Mediciones de velocidades a la entrada y salida del captador de corriente de aire.

Hora	V_entrada	V_salida	ΔV (%)
10h00	2,10	2,55	21,4
10h05	3,20	3,75	17,2
10h10	2,10	2,85	35,7
10h15	4,10	4,75	15,9
10h20	3,80	4,05	6,6
10h25	3,30	3,85	16,7
10h30	2,80	3,25	16,1
10h35	2,10	2,65	26,2
10h40	3,10	3,95	27,4
10h45	0,90	1,55	72,2
10h50	2,10	2,65	26,2
10h55	1,90	2,45	28,9
11h00	3,60	4,15	15,3
11h05	1,70	2,15	26,5
11h10	0,90	1,35	50,0
11h15	2,10	2,55	21,4
11h20	2,50	3,05	22,0
11h25	0,90	1,45	61,1
11h30	2,20	2,75	25,0
11h35	1,10	1,95	77,3
11h40	1,90	2,35	23,7
11h45	1,90	2,45	28,9
11h50	0,90	1,35	50,0
Promedio	2,23	2,78	30,9

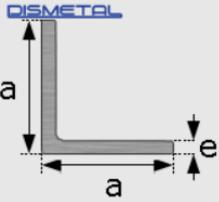
Anexo 7. Dimensiones y masa de la lámina galvanizada y ángulo de acero.

- Características de lámina galvanizada.

		
DIMENSIÓN	ESPESOR	PESO KG
1.22 x 2.44	0.5	11.69
0.7	0.7	16.36
0.75	0.75	17.53
0.9	0.9	21.03
1	1	23.37
1.1	1.1	25.71
1.2	1.2	28.04
1.4	1.4	32.72
1.9	1.9	44.4
2	2	46.74
2.5	2.5	58.43
3	3	70.11

Fuente: REIPROACERO SA, (2022)

- Dimensiones y masa de ángulo de acero.

		CALIDAD:	ASTMA36
		OTRAS CALIDADES:	PREVIA CONSULTA
		LARGO NORMAL:	6.00m
		OTROS LARGOS:	PREVIA CONSULTA
		ACABADOS:	NATURAL
		OTROS ACABADOS:	PREVIA CONSULTA

DIMENSIONES		LARGO	PESO
a	e	m.	kg/6m
mm	mm		
20	3	6000	5.23
25	3	6000	6.74
25	4	6000	9.2
30	3	6000	8.24
30	4	6000	10.61
40	3	6000	11.11

Fuente: REIPROACERO SA, (2022)

Anexo 8. Costos totales del sistema de enfriamiento mediante corriente de aire.

- Materiales y componentes.

Materiales y componentes	Cantidad	C. Unitario (USD)	Subtotal (USD)
Platina de 30mm x 3mm” de espesor (6m)	2	8,50	17,00
Plancha de acero galvanizado de 0,70 mm (122 x 44cm)	1	23,80	23,80
Tubo PVC de 3” (3m)	1	8,45	8,45
Codo PVC de 90° (3”)	2	2,50	5,00
Manzana (buje) 13,8cm, eje de 3/8”	1	3,50	3,50
Electrodos E-6011 (0,5 lb)	1	0,80	0,80
Perno M8 x30 mm	8	0,15	1,20
Tuerca M8	8	0,5	0,40
Arandela M8 diámetro interior x 18mm de diámetro exterior y 2mm de espesor	8	0,05	0,40
Pega-tubo, un frasco de 100ml	1	1,80	1,80
Tornillo M10 x 65mm	4	0,18	0,72
Tacos M8 x 50mm	4	0,5	0,20
Pintura Spray, negro mate, 400ml	1	3,60	6,60
Paneles solares, 50 Wp	2	51,80	103,60
Sensor de Temperatura	4	3,80	15,20
Angulo 3cm x3 cm	1	11,50	11,50
Costo total de materiales			200,17

- Costo de construcción de piezas.

Proceso de construcción	Costo (USD)
Corte y perforaciones de los elementos de la Base del sistema.	15
Corte y soldadura de lámina galvanizada, para construcción del captador de corriente de aire	25,0
Corte de lámina galvanizada para la construcción de la veleta	5
Elaboración de la boquilla mediante aplicación de calor a tubo PVC.	7
Pintado de componentes del sistema	5
Armado del sistema de enfriamiento	7
Total	64,00

Anexo 9.

Anexo 9. Propiedades físicas del material del eje que une la veleta-captador.



DESCRIPCIÓN

Es una varilla de acero de sección circular, con resaltes transversales que asegura una alta adherencia con el concreto; laminada en caliente y termotratada que garantiza mayor flexibilidad y seguridad que el acero común. Soldable, cumpliendo la norma AWS D1.4, según lo especificado en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC).

USOS

Principalmente como refuerzo en estructuras de hormigón armado.

NORMAS TÉCNICAS

NTE INEN 2167 (Ecuatoriana)
Varillas de acero corrugadas y lisas de baja aleación para refuerzo de hormigón. Requisitos

ASTM A706 (Americana)
Standard Specification for Deformed and Plain Low-Alloy Steel Bars for Concrete Reinforcement.

TABLA DE VARILLA								
Diámetro mm	kg/m	12 m		9 m		6 m		Tolerancia en Longitud
		kg	Var x qq	kg	Var x qq	kg	Var x qq	
8	0,395	4,740	9,568	3,555	12,757	2,370	19,136	± 50mm
10	0,617	7,404	6,125	5,553	8,167	3,702	12,251	
12	0,888	10,656	4,256	7,992	5,675	5,328	8,512	
14	1,208	14,496	3,129	10,872	4,171	7,248	6,257	
16	1,578	18,936	2,395	14,202	3,193	9,468	4,790	
18	1,998	23,976	1,892	17,982	2,522	11,988	3,783	
20	2,466	29,592	1,533	22,194	2,043	14,796	3,065	
22	2,984	35,808	1,267	26,856	1,689	17,904	2,533	
25	3,853	46,236	0,981	34,677	1,308	23,118	1,962	
28	4,834	58,008	0,782	43,506	1,042	29,004	1,564	
32	6,313	75,756	0,599	56,817	0,798	37,878	1,197	
36	7,990	95,880	0,473	71,910	0,631	47,940	0,946	
40	9,865	118,38	0,383	88,785	0,511	59,190	0,766	

PROPIEDADES MECÁNICAS	MPa	kgf/mm ²
Límite de fluencia mínimo	420	42
Límite de fluencia máximo	540	55
Resistencia a la tracción mínima	550	56

ALARGAMIENTO (%) MÍNIMO CON PROBETA Lo=200mm	
Diámetro nominal (mm)	%
d ≤ 20	14
22 ≤ d ≤ 36	12
d > 36	10

DOBLADO A 180°	
Diámetro nominal (d) mm	Diámetro del mandril (D) mm
d < 18	D=3d
18 ≤ d ≤ 25	D=4d
25 < d ≤ 36	D=6d
d > 36	D=8d

- ▶ Varillas Rectas de longitudes estándar de 6, 9 y 12 m.
- ▶ Longitudes especiales bajo pedido.

Fuente: (Empresa ADELCA CA., 2020)

Anexo 10. Ficha técnica de pletinas.



DESCRIPCIÓN

Pletinas de acero de sección rectangular, laminadas en caliente.

USOS

Se utilizan para múltiples propósitos dentro del sector metal-mecánico, cerrajería ornamental, manufactura de muebles, carrocerías vehiculares, herramientas manuales y trabajos de carpintería metálica en general.

NORMAS TÉCNICAS

NTE INEN 2215 (Ecuatoriana)

Perfiles de acero laminados en caliente. Requisitos.

NTE INEN 2222 (Ecuatoriana)

Barras cuadradas, redondas y pletinas de acero laminadas en caliente. Requisitos.

ASTM A36 (Americana)

Standard Specification for Carbon Structural Steel.

DIMENSIÓN		MASA NOMINAL		TOLERANCIAS	
mm	pulg <small>valor de referencia aproximado</small>	kg/m	kg/6m	Lado mm	Espesor mm
12 x 3	1/2 x 1/8	0,283	1,698	± 1,0	±0,50
12 x 4	1/2 x 3/16	0,377	2,262		
12 x 6	1/2 x 1/4	0,565	3,391		
19 x 3	3/4 x 1/8	0,477	2,885		
19 x 4	3/4 x 3/16	0,597	3,582		
19 x 6	3/4 x 1/4	0,895	5,369		
25 x 3	1 x 1/8	0,589	3,534		
25 x 4	1 x 3/16	0,785	4,710		
25 x 6	1 x 1/4	1,178	7,068		
30 x 3	1 1/4 x 1/8	0,707	4,242		
30 x 4	1 1/4 x 3/16	0,942	5,652		
30 x 6	1 1/4 x 1/4	1,413	8,478		
*38 x 3	1 1/2 x 1/8	0,895	5,370		
*38 x 4	1 1/2 x 3/16	1,193	7,158		
*38 x 6	1 1/2 x 1/4	1,790	10,740		
50 x 3	2 x 1/8	1,178	7,068		
50 x 4	2 x 3/16	1,570	9,420		
50 x 6	2 x 1/4	2,355	14,130		
*65 x 6	2 1/2 x 1/4	3,062	18,372		
65 x 8	2 1/2 x 5/16	4,082	24,492		
65 x 12	2 1/2 x 1/2	6,123	36,739		
75 x 6	3 x 1/4	3,533	21,198		
75 x 8	3 x 5/16	4,710	28,260		
75 x 12	3 x 1/2	7,065	42,390		
Tolerancia de longitud: +100/-10mm					

* Dimensiones bajo Norma ASTM A36 (Americana)

PROPIEDADES MECÁNICAS	ASTM Grado A36		INEN 2215 grado E185	
	kgf/mm ²	MPa	kgf/mm ²	MPa
Límite de Fluencia mínimo	25	250	19	185
Resistencia a la tracción mínima	41	400	31	300
Resistencia a la tracción máxima	56	550	55	540
Alargamiento (%) mínimo con probeta Lo=200	Lo = 200 20%		Lo = 5,65 *√A _o 18 %	

▶ Se producen en longitudes estándar de 6m. Longitudes especiales bajo pedido.

Fuente: Empresa ADELCA CA., (2020)

Anexo 11. Factor de seguridad para diseño de piezas mecánicas.

- Método de Pugsley.

$$n_s = n_{xx} * n_{yy}$$

n_{xx} : Factor de seguridad que involucran características A, B y C.

n_{yy} : Factor de seguridad que involucran características D y E

A: Calidad de los materiales.

B: Control sobre la carga aplicada.

C: Exactitud del análisis del esfuerzo.

D: Peligro para el personal.

E: Impacto económico.

Característica		B				
		mb	b	r	p	
A=mb	C=	mb	1.1	1.3	1.5	1.7
		b	1.2	1.45	1.7	1.95
		r	1.3	1.6	1.9	2.2
		p	1.4	1.75	2.1	2.45
A=b	C=	mb	1.3	1.55	1.8	2.05
		b	1.45	1.75	2.05	2.35
		r	1.6	1.95	2.3	2.65
		p	1.75	2.15	2.55	2.95
A=r	C=	mb	1.5	1.8	2.1	2.4
		b	1.7	2.05	2.4	2.75
		r	1.9	2.3	2.7	3.1
		p	2.1	2.55	3.0	3.45
A=p	C=	mb	1.7	2.05	2.4	2.75
		b	1.95	2.35	2.75	3.15
		r	2.2	2.65	3.1	3.55
		p	2.45	2.95	3.45	3.95
mb= muy bien		b= bien				
r= regular		p= pobre				

Característica		D		
		ns	s	ms
E=	ns	1.0	1.2	1.4
	s	1.0	1.3	1.5
	ms	1.2	1.4	1.6
ms= muy serio		s= serio	ns= no serio	

Fuente: Kenneth S & Mckee, (1992).

Anexo 12. Especificaciones material del material de placa rectangular de la veleta.



PLETINA ADELCA

DESCRIPCIÓN

Pletinas de acero de sección rectangular, laminadas en caliente.

USOS

Se utilizan para múltiples propósitos dentro del sector metal-mecánico, cerrajería ornamental, manufactura de muebles, carrocerías vehiculares, herramientas manuales y trabajos de carpintería metálica en general.

NORMAS TÉCNICAS

NTE INEN 2215 (Ecuatoriana)

Perfiles de acero laminados en caliente. Requisitos.

NTE INEN 2222 (Ecuatoriana)

Barras cuadradas, redondas y pletinas de acero laminadas en caliente. Requisitos.

ASTM A36 (Americana)

Standard Specification for Carbon Structural Steel.

DIMENSIÓN		MASA NOMINAL		TOLERANCIAS	
mm	pulg <small>valor de referencia aproximado</small>	kg/m	kg/6m	Lado mm	Espesor mm
12 x 3	1/2 x 1/8	0,283	1,698	± 10	±0,50
12 x 4	1/2 x 3/16	0,377	2,262		
12 x 6	1/2 x 1/4	0,565	3,391		
19 x 3	3/4 x 1/8	0,477	2,885		
19 x 4	3/4 x 3/16	0,597	3,582		
19 x 6	3/4 x 1/4	0,895	5,369		
25 x 3	1 x 1/8	0,589	3,534		
25 x 4	1 x 3/16	0,785	4,710		
25 x 6	1 x 1/4	1,178	7,068		
30 x 3	1 1/4 x 1/8	0,707	4,242		
30 x 4	1 1/4 x 3/16	0,942	5,652		
30 x 6	1 1/4 x 1/4	1,413	8,478		
*38 x 3	1 1/2 x 1/8	0,895	5,370		
*38 x 4	1 1/2 x 3/16	1,193	7,158		
*38 x 6	1 1/2 x 1/4	1,790	10,740		
50 x 3	2 x 1/8	1,178	7,068		
50 x 4	2 x 3/16	1,570	9,420		
50 x 6	2 x 1/4	2,355	14,130		
*65 x 6	2 1/2 x 1/4	3,062	18,372		
65 x 8	2 1/2 x 5/16	4,082	24,492		
65 x 12	2 1/2 x 1/2	6,123	36,739		
75 x 6	3 x 1/4	3,533	21,198		
75 x 8	3 x 5/16	4,710	28,260		
75 x 12	3 x 1/2	7,065	42,390		

Tolerancia de longitud: +100/-10mm

* Dimensiones bajo Norma ASTM A36 (Americana)

PROPIEDADES MECÁNICAS	ASTM Grado A36		INEN 2215 grado E185	
	kgf/mm ²	MPa	kgf/mm ²	MPa
Límite de Fluencia mínimo	25	250	19	185
Resistencia a la tracción mínima	41	400	31	300
Resistencia a la tracción máxima	56	550	55	540
Alargamiento (%) mínimo con probeta Lo=200	Lo = 200 20%		Lo = 5,65 *√A _e 18 %	

► Se producen en longitudes estándar de 6m. Longitudes especiales bajo pedido.

Fuente: Empresa ADELCA CA., (2020)

Anexo 13. Tablas de mediciones realizadas para la validación del sistema de enfriamiento mediante corriente de aire.

- **Variables y nomenclaturas utilizadas en las tablas.**

Variable	Denominación.	Unidades
Temperatura superior del panel con enfriamiento.	T1_sup	°C
Temperatura inferior del panel con enfriamiento.	T2_inf	°C
Temperatura superior del panel sin enfriamiento.	T3_sup	°C
Temperatura inferior del panel sin enfriamiento.	T4_inf	°C
Voltaje de circuito abierto del panel con enfriamiento	V_P1	V
Voltaje de circuito abierto del panel sin enfriamiento	V_P2	V
Temperatura ambiente.	T α	°C
Velocidad del viento del sitio.	V_ α	m/s
Velocidad del viento a la salida del sistema.	V_s	m/s
Radiación solar. Tabla d).	G	W/m ²

a). Datos obtenidos 25 de julio del 2023, sector Trapichillo alto – Catamayo.

Hora	T1_s up	T2_in f	V_P1	T3_sup	T4_inf.	V_P2	T α	V_ α	V_s
12h55	36,34	35,76	20,41	41,21	40,12	19,90	32,10	1,70	3,1
13h00	32,66	32,19	20,00	37,33	37,25	19,20	30,12	3,70	5,1
13h05	32,97	32,38	20,40	37,87	37,06	19,60	32,00	0,80	2,3
13h10	32,22	31,26	20,40	36,4	35,12	19,50	31,00	1,30	2,8
13h15	31,34	30,07	20,50	35,71	34,68	19,60	28,07	1,70	2,9
13h20	30,97	29,50	20,40	35,58	34,37	19,50	29,00	3,80	5,4
13h25	31,66	30,13	20,02	36,02	34,43	19,70	30,00	2,30	3,7
13h30	31,78	30,04	20,20	36,87	34,56	19,50	29,00	3,20	4,7
13h35	31,22	29,82	20,40	35,64	34,18	19,60	28,00	3,40	4,8
13h40	30,03	28,69	20,30	34,39	33,06	19,70	27,00	1,90	3,2
13h45	30,28	28,82	20,40	33,64	33,12	19,70	27,20	0,80	2,1
13h50	30,59	29,07	20,50	33,97	33,56	19,70	28,90	5,40	6,9
13h55	31,03	29,50	20,60	34,58	33,93	19,80	29,25	0,60	1,7
14h00	31,4	29,94	20,30	34,96	34,43	19,70	29,45	1,50	3,1
14h05	31,28	29,73	20,40	34,64	33,99	19,60	29,45	1,60	2,9
14h10	31,91	30,19	21,10	37,4	34,62	20,50	30,14	0,80	2,1
14h15	32,66	31,01	20,40	36,65	35,77	19,70	31,00	0,40	1,5
14h20	32,34	31,19	20,20	36,33	35,06	19,60	29,36	0,60	1,7
14h25	30,35	28,08	20,20	35,04	33,99	19,50	27,00	0,40	1,5
14h30	30,72	29,19	20,40	37,27	34,12	19,70	26,50	3,60	5,4
14h35	31,34	29,82	20,20	36,71	34,18	19,50	25,00	3,40	5,1
14h40	30,65	29,44	20,40	34,39	33,99	19,50	24,00	1,80	3,5
Promedio.	31,62	30,26	20,37	36,03	34,80	19,65	28,94	2,04	3,43

b). Mediciones 26 de julio del 2023, ciudadela Electricista Alto, Loja.

Hora	T1_sup	T2_inf	V_P1	T3_sup	T4_Inf	V_P2	T α	V_ α	V_s
10h15	32,58	31,88	20,50	34,92	35,00	19,90	17,35	1,30	2,51
10h20	32,75	32,50	20,80	36,12	36,04	19,80	17,50	1,20	2,21
10h25	30,81	30,69	20,80	35,55	36,38	20,00	17,86	1,50	2,91
10h30	31,12	31,10	20,80	34,61	35,81	19,60	18,00	1,00	2,11
10h35	33,44	33,08	20,50	36,68	36,81	19,70	19,09	0,40	1,31
10h40	31,69	31,35	20,90	34,55	35,13	19,90	19,42	2,20	3,21
10h45	30,66	30,40	19,50	33,36	34,88	18,30	19,56	4,50	6,31
10h50	29,62	29,20	21,50	34,61	33,38	20,30	19,70	0,30	1,21
10h55	32,25	31,85	21,30	37,68	36,25	19,90	19,50	3,20	4,51
11h00	28,37	28,40	21,40	34,36	35,69	20,00	20,00	2,50	3,91
11h05	34,44	32,31	20,40	40,45	37,20	20,00	21,13	3,00	4,21
11h10	36,06	35,25	19,90	39,11	36,31	19,80	20,30	0,40	1,31
11h15	31,49	32,06	20,90	35,68	34,38	20,00	21,26	1,00	2,21
11h20	35,19	35,15	19,60	39,86	36,19	18,90	21,00	1,40	2,51
11h25	36,38	36,03	20,70	39,24	36,00	19,80	21,45	1,50	2,71
11h30	34,12	34,06	20,90	37,26	34,56	20,70	19,00	2,80	4,01
11h35	30,56	32,25	21,10	34,55	34,06	20,30	19,73	3,20	4,81
11h40	35,19	35,15	19,60	39,86	36,19	18,90	20,10	1,40	2,51
11h45	30,00	29,80	21,00	36,3	33,42	19,80	20,50	2,60	3,81
11h50	29,06	24,06	21,30	34,55	32,25	20,40	21,06	3,10	4,51
11h55	28,81	26,20	21,10	33,85	30,94	20,20	22,15	4,30	5,51
12h00	27,37	27,50	21,20	33,11	30,94	20,30	21,65	1,00	2,11
12h05	27,56	27,40	21,00	34,18	31,84	20,20	21,45	2,50	3,91
12h10	27,75	27,50	21,20	32,36	30,50	20,30	22,36	5,40	7,11
12h15	29,56	28,64	21,20	32,67	30,75	20,30	21,86	3,60	4,71
12h20	30,81	30,37	20,30	32,74	30,75	20,20	22,05	0,40	1,31
12h25	29,62	29,56	21,02	32,42	30,62	20,03	22,15	2,80	4,21
12h30	32,31	33,25	20,90	35,36	33,25	20,00	21,42	0,60	1,71
12h35	30,75	31,00	21,00	33,67	31,37	20,20	22,64	2,90	4,21
12h40	29,37	29,00	21,50	34,24	32,75	20,20	22,06	1,80	3,11
12h45	30,56	30,87	21,30	34,12	32,38	20,20	22,15	0,40	1,31
12h50	32,31	31,87	21,30	35,86	33,44	20,10	22,10	1,80	3,11
12h55	32,69	33,00	21,35	39,43	36,44	19,80	21,54	3,60	4,91
13h00	31,37	31,25	21,20	38,74	35,81	19,80	21,46	1,80	3,31
13h05	34,38	34,19	21,00	40,18	36,63	19,70	22,36	0,40	1,31
13h10	35,16	35,00	20,20	39,86	36,81	19,10	22,15	0,80	2,11
13h15	36,06	38,25	19,70	40,3	38,50	19,70	22,30	0,20	1,11
13h20	35,81	35,75	18,90	39,74	37,19	18,00	22,64	0,40	1,31
13h25	33,06	32,89	20,50	37,18	34,89	19,60	22,17	1,40	2,71
13h30	34,50	35,50	20,10	37,93	35,44	19,20	22,36	1,50	2,81
13h35	29,75	29,25	20,50	34,11	36,13	19,40	22,25	2,20	3,51
13h40	28,12	29,25	20,00	31,86	30,06	18,80	22,45	2,80	4,21
13h45	28,12	28,01	21,00	33,36	30,12	20,50	22,59	2,30	3,51
13h50	27,62	27,56	19,00	31,55	29,31	18,50	22,64	5,20	6,51

Hora	T1_sup	T2_inf	V_P1	T3_sup	T4_Inf	V_P2	T α	V $_{\alpha}$	V_s
13h55	25,12	25,69	18,06	27,67	25,69	18,05	22,46	1,20	2,31
14h00	26,12	25,94	22,10	31,24	28,44	21,30	22,76	1,70	3,31
14h05	31,23	31,00	21,20	36,88	34,12	20,30	22,36	2,40	3,91
14h10	33,64	33,56	18,00	36,61	33,96	17,60	22,47	0,80	1,91
Promedio.	31,36	31,18	20,61	35,64	33,83	19,74	21,14	1,97	2,50

c). Mediciones 29 de julio del 2023, sector Trapichillo Alto-Catamayo.

Hora	T1_sup	T2_inf	V_P1	T3_sup	T4_Inf	V_P2	T α	V $_{\alpha}$	V_s
13h40	31,75	31,25	20,85	40,34	38,94	20,00	25,40	4,50	7,3
13h45	30,38	29,94	20,96	38,71	36,88	20,39	26,00	1,70	4,2
13h50	31,75	32,75	21,02	38,96	37,88	20,38	27,20	2,80	5,2
13h55	31,38	32,88	19,60	39,40	37,56	19,31	27,40	2,70	4,8
14h00	31,75	32,25	21,12	37,65	36,50	20,48	26,90	3,20	5,2
14h05	33,00	33,06	21,01	38,78	37,44	19,45	26,45	1,50	3,6
14h10	32,00	32,25	20,78	38,90	36,94	19,40	26,89	2,50	4,7
14h15	31,94	30,81	20,30	38,09	35,94	19,30	26,50	3,10	6,1
14h20	32,75	32,44	21,08	37,34	36,50	19,81	26,74	4,80	7,8
14h25	31,69	31,63	21,25	36,28	35,63	20,50	25,89	1,60	3,3
14h30	30,94	27,25	20,34	35,53	34,56	19,67	25,90	2,80	4,9
14h35	32,55	31,69	21,15	36,28	36,56	20,55	26,40	2,00	4,1
14h40	30,75	31,00	21,21	35,03	35,44	20,50	26,15	1,80	3,8
14h45	31,69	31,44	21,07	35,09	35,31	20,44	26,00	0,80	2,8
14h50	32,00	32,00	21,02	35,40	35,88	20,43	26,30	1,40	3,3
14h55	33,13	32,93	21,00	36,15	36,25	20,34	25,68	0,80	2,9
15h00	31,94	31,81	20,97	35,65	35,56	20,33	24,94	0,80	2,8
15h05	29,19	29,56	19,37	33,65	33,94	18,73	25,18	1,80	3,7
15h10	28,53	27,69	21,20	31,90	31,69	20,30	24,32	2,10	3,9
15h15	25,94	25,56	19,73	30,02	30,31	19,01	24,45	1,50	3,5
15h20	24,75	25,60	19,81	28,27	28,75	19,13	24,14	1,30	3,1
15h25	24,00	25,40	20,07	27,46	27,87	19,37	24,18	6,50	8,5
15h30	24,50	24,85	21,20	27,59	28,00	20,91	24,13	1,40	3,7
15h35	24,94	25,13	19,83	28,35	28,87	19,08	24,50	1,80	3,4
15h40	24,83	24,68	20,16	27,77	28,31	19,90	24,36	5,40	7,5
Promedio.	29,92	29,83	20,64	34,74	34,30	19,91	25,68	2,42	4,56

d). Mediciones 01 de septiembre del 2023, ciudadela Electricista Alto, Loja.

Hora	T2_inf	T4_Inf	ΔT	T α	V $_{\alpha}$	V_s	G
12h00	25,1	29	3,9	20,10	2,00	2,90	480
12h05	28,75	34,45	5,7	20,75	2,20	3,50	757
12h10	32,82	38,12	5,3	21,00	3,40	4,60	987
12h15	28,55	32,6	4,05	21,94	4,40	6,70	757
12h20	34,51	39,5	4,99	22,20	3,10	4,50	997
12h25	29,81	35,12	5,31	22,18	3,00	3,60	727
12h30	25,45	29,86	4,41	21,90	2,80	4,60	487
12h35	26,95	31,5	4,55	21,96	2,60	5,80	467

Hora	T2_inf	T4_Inf	ΔT	T α	V_ α	V_s	G
12h40	25,32	30,12	4,8	21,70	2,20	3,70	492
12h45	27,31	31,68	4,37	21,88	3,80	5,80	752
12h50	31,63	35,84	4,21	22,30	2,10	2,50	778
12h55	34,26	40,25	5,99	22,25	3,20	3,90	978
13h00	27,4	33,64	6,24	22,15	3,10	5,30	672
13h05	27,95	32,18	4,23	21,50	2,90	3,80	572
13h10	24,64	28,46	3,82	21,65	3,40	4,80	450
13h15	29,59	36,12	6,53	21,96	2,00	2,30	702
13h20	35,14	38,88	3,74	21,24	2,70	3,60	980
13h25	30,11	35	4,89	22,75	2,50	2,90	607
13h30	30,64	35,19	4,55	22,48	6,30	5,80	834
13h35	29,82	34,69	4,87	21,36	3,10	4,10	837
13h40	28,15	34,24	6,09	22,36	2,90	3,80	660
13h45	30,89	35,13	4,24	22,48	2,20	3,30	646
13h50	31,51	35,81	4,3	22,88	2,20	3,70	834
13h55	25,65	30,03	4,38	22,80	3,30	4,30	459
14h00	29,41	33,56	4,15	22,65	2,50	3,00	540
14h05	27,89	34,75	6,86	22,60	3,00	4,50	682
14h10	27,76	33,63	5,87	22,30	3,60	5,60	728
14h15	29,21	33,86	4,65	23,10	1,50	3,40	544
14h20	28,91	33,25	4,34	22,85	2,30	3,70	546
14h25	24,76	30,31	5,55	22,94	2,60	4,20	407
14h30	30,95	36,5	5,55	22,56	2,70	3,10	700
14h35	33,01	37,62	4,61	22,74	1,90	2,80	701
14h40	32,76	36,12	3,36	23,38	3,20	4,50	682
14h45	31,40	36,37	4,97	23,18	2,30	2,70	679
14h50	34,64	38,12	3,48	23,24	3,50	5,50	820
14h55	33,30	37,95	4,65	23,80	2,50	2,90	809
15h00	33,40	38,1	4,7	22,74	2,80	3,70	752
15h05	31,26	35,37	4,11	23,64	3,30	4,60	678
15h10	31,95	36,46	4,51	23,50	2,20	2,50	632
15h15	31,07	35,64	4,57	23,85	3,08	4,40	641
15h20	30,89	35,94	5,05	24,12	1,80	3,20	666
15h25	31,58	35,56	3,98	23,86	1,50	3,40	619
15h30	33,51	36,64	3,13	24,05	2,40	5,80	675
Promedio.	29,99	34,72	4,73	22,49	2,79	4,03	684

Anexo 14. Cálculos de potencias, temperatura de celda teórica, y porcentaje de error entre la temperatura medida y calculada.

Variable	Denominación.	Unidades
Potencia calculada para el panel con enfriamiento.	P_P1	W
Potencia calculada para el panel sin enfriamiento.	P_P2	W
Mejoramiento de potencia con el sistema de enfriamiento.	ΔP	W
Temperatura medida del panel sin enfriamiento.	T4_P2_inf	°C
Temperatura calculada del panel sin enfriamiento	Tc_calculada	°C
Radiación	G	W/m ²

Hora	P_P1	P_P2	ΔP	ΔP	T4_P2_Inf	Tc_calculada	% de Error
12h00	23,99	23,64	0,36	1,50%	29,00	30,44	4,72%
12h05	37,31	36,49	0,82	2,25%	34,45	36,90	6,64%
12h10	47,88	46,89	0,99	2,12%	38,12	40,42	5,69%
12h15	37,34	36,76	0,58	1,58%	32,60	35,85	9,07%
12h20	48,05	47,10	0,95	2,01%	39,50	42,25	6,50%
12h25	35,69	34,95	0,73	2,10%	35,12	36,84	4,66%
12h30	24,31	23,90	0,41	1,71%	29,86	31,81	6,14%
12h35	23,18	22,77	0,40	1,77%	31,50	31,60	0,32%
12h40	24,57	24,12	0,45	1,86%	30,12	32,16	6,33%
12h45	37,27	36,65	0,62	1,70%	31,68	36,24	12,59%
12h50	37,92	37,30	0,62	1,67%	35,84	39,05	8,21%
12h55	47,18	46,07	1,11	2,42%	40,25	41,78	3,65%
13h00	33,29	32,50	0,80	2,45%	33,64	35,59	5,48%
13h05	28,28	27,82	0,46	1,65%	32,18	33,08	2,71%
13h10	22,53	22,20	0,33	1,47%	28,46	30,43	6,49%
13h15	34,49	33,62	0,87	2,59%	36,12	37,16	2,80%
13h20	47,11	46,42	0,70	1,50%	38,88	41,49	6,28%
13h25	29,76	29,20	0,56	1,93%	35,00	35,41	1,15%
13h30	40,81	40,09	0,72	1,80%	35,19	36,18	2,74%
13h35	41,08	40,31	0,77	1,92%	34,69	38,14	9,04%
13h40	32,60	31,84	0,76	2,40%	34,24	35,75	4,21%
13h45	31,58	31,06	0,52	1,68%	35,13	36,25	3,10%
13h50	40,67	39,99	0,68	1,70%	35,81	40,73	12,07%
13h55	22,89	22,51	0,38	1,70%	30,03	31,83	5,66%
14h00	26,55	26,12	0,43	1,63%	33,56	33,90	0,99%
14h05	33,73	32,84	0,89	2,71%	34,75	36,34	4,38%
14h10	36,02	35,21	0,81	2,31%	33,63	36,39	7,59%
14h15	26,76	26,28	0,48	1,83%	33,86	35,31	4,11%
14h20	26,89	26,44	0,45	1,70%	33,25	34,39	3,32%
14h25	20,37	19,94	0,43	2,15%	30,31	31,34	3,29%
14h30	34,21	33,47	0,74	2,21%	36,50	36,97	1,27%
14h35	33,98	33,37	0,61	1,84%	37,62	38,04	1,11%
14h40	33,09	32,66	0,44	1,33%	36,12	36,94	2,23%
14h45	33,12	32,48	0,64	1,97%	36,37	37,57	3,19%
14h50	39,50	38,96	0,54	1,39%	38,12	39,25	2,89%
14h55	39,17	38,46	0,71	1,86%	37,95	40,74	6,85%

Hora	P_P1	P_P2	Δ P	Δ P	T4_P2_Inf	Tc_calculada	% de Error
15h00	36,40	35,73	0,67	1,88%	38,10	38,13	0,07%
15h05	33,09	32,56	0,53	1,63%	35,37	37,03	4,49%
15h10	30,77	30,22	0,54	1,79%	36,46	36,98	1,41%
15h15	31,31	30,75	0,56	1,81%	35,64	36,70	2,89%
15h20	32,55	31,92	0,64	2,00%	35,94	38,77	7,31%
15h25	30,18	29,71	0,47	1,58%	35,56	37,78	5,88%
15h30	32,66	32,26	0,40	1,24%	36,64	38,26	4,23%
Prome dio.	33,49	32,87	0,62	1,87%	34,72	36,47	4,74%

Anexo 15. Fotografías, mediciones realizadas.



a). Sistema de enfriamiento instalado, sector Electricista Alto – Loja.



b). Mediciones de temperaturas en el panel con enfriamiento y sin enfriamiento.



c). Mediciones de temperaturas en los paneles solares, sector Trapichillo Alto-Catamayo.

Anexo 16. Planos del sistema de enfriamiento.

(Ubicados en el CD-R Nro1.)

Anexo 17. Certificación de traducción del resumen.



Lic. Karina Yajaira Martínez Luzuriaga

LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN MENCIÓN INGLÉS

CERTIFICO:

Yo, Karina Yajaira Martínez Luzuriaga con cédula de identidad Nro. 1104902679, **Licenciada en Ciencias de la Educación Mención Inglés** por la Universidad Técnica Particular de Loja, con número de registro 1031-2022-2574017 en la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación, señalo que el presente documento es fiel traducción del idioma español al idioma inglés del resumen del Trabajo de Titulación denominado **“Diseño y construcción de un sistema de enfriamiento superficial de paneles fotovoltaicos mediante corriente de aire.”** elaborado por el Sr. Patricio Fernando Lafebre Álvarez, con cédula de identidad Nro. 1150407672, estudiante egresado de la carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Nacional de Loja.



Lic. Karina Yajaira Martínez Luzuriaga

C.I. 1104902679

REGISTRO SENESCYT N°: 1031-2022-2574017