

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica



TESIS

Análisis energético de estrategias de optimización en el diseño de paneles solares bajo las condiciones climáticas de la ciudad de Piura

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista

Elaborado por

Ivan Guillermo Paz Gómez

 [0009-0003-5014-7262](https://orcid.org/0009-0003-5014-7262)

Asesor

Msc. Ing. Robert Gerardo Castro Salguero

 [0000-0001-9909-3435](https://orcid.org/0000-0001-9909-3435)

LIMA – PERÚ

2025

Dedicatoria

A mis padres y a Lamia

Resumen

En el presente trabajo se analizaron y compararon diferentes estrategias de optimización en el diseño de paneles solares, con el objetivo de identificar el que nos genera la mayor eficiencia energética bajo las condiciones climáticas específicas de la ciudad de Piura. Se evaluaron técnicas como los sistemas automáticos de seguimiento solar, y los diseños híbridos fotovoltaico-térmicos con refrigeración activa, considerando sus ventajas y limitaciones.

La metodología incluye la obtención de datos climatológicos mediante la base de datos del NREL, además del análisis comparativo de los resultados de energía entregada y eficiencia obtenidos mediante simulación por software y por diferentes autores.

Se representó en un gráfico la relación inversamente proporcional de la temperatura y la eficiencia del panel, por lo que se demuestra la importancia de un sistema de refrigeración. Además, la refrigeración activa de agua demostró ser la más efectiva y accesible.

Los sistemas de seguimiento resultaron aumentar la captación de rayos solares en 27.83% para los de un eje y en 37.28% para los de dos ejes, mientras que la implementación de un sistema híbrido aumentó la eficiencia en un 162.39%.

Comparando las diferentes celdas solares que existen, se pudo concluir que el panel de silicio monocristalino es el óptimo en cuanto a eficiencia y disponibilidad.

Palabras clave: Eficiencia energética, panel solar, captación solar, optimización, comparación, sistema híbrido, eficiencia térmica.

Abstract

In this work, different optimization strategies in the design of solar panels were analyzed and compared, with the aim of identifying the one that generates the greatest energy efficiency under the specific climatic conditions of the city of Piura. Techniques such as automatic solar tracking systems and hybrid photovoltaic-thermal designs with active cooling were evaluated, considering their advantages and limitations.

The methodology includes obtaining climatological data through the NREL database, in addition to the comparative analysis of the results of energy delivered and efficiency obtained through software simulation and by different authors.

The inversely proportional relationship between temperature and panel efficiency was represented in a graph, thus demonstrating the importance of a cooling system. In addition, active water cooling proved to be the most effective and accessible.

Tracking systems were found to increase solar ray capture by 27.83% for single-axis systems and by 37.28% for dual-axis systems, while the implementation of a hybrid system increased efficiency by 162.39%.

Comparing the different solar cells that exist, it was possible to answer that the monocrystalline silicon panel is the optimal one in terms of efficiency and availability.

Keywords: Energy efficiency, solar panel, solar capture, optimization, comparison, hybrid system, thermal efficiency.

Índice

Capítulo I. Generalidades.....	1
1.1. Antecedentes de la Investigación	1
1.1.1. <i>Antecedentes Internacionales</i>	1
1.1.2. <i>Antecedentes Nacionales</i>	2
1.2. Identificación y Descripción del Problema de Estudio	4
1.3. Formulación del Problema	5
1.3.1. <i>Problema General</i>	5
1.3.2. <i>Problema Específico</i>	5
1.4. Justificación e importancia	5
1.5. Objetivos.....	6
1.5.1. <i>Objetivo General</i>	6
1.5.2. <i>Objetivos Específicos</i>	6
1.6. Hipótesis.....	6
1.6.1. <i>Hipótesis General</i>	6
1.6.2. <i>Hipótesis Específicas</i>	6
1.7. Variables y Operacionalización de variables.....	7
1.7.1. <i>Operacionalización de variables</i>	7
1.8. Metodología de la Investigación	8
1.8.1. <i>Unidad de análisis</i>	8
1.8.2. <i>Tipo, enfoque, nivel de la investigación</i>	8
1.8.3. <i>Diseño de la Investigación</i>	8
1.8.4. <i>Fuentes de información</i>	8
1.8.5. <i>Población y Muestra</i>	9
1.8.6. <i>Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos</i>	9
1.8.7. <i>Análisis y Procesamiento de Datos</i>	9
Capítulo II. Marco Teórico	11

2.1.	Bases Teóricas.....	11
2.1.1.	<i>Energía y radiación solar</i>	11
2.1.2.	<i>Medición de la radiación solar</i>	13
2.1.3.	<i>Movimiento de la tierra</i>	14
2.1.4.	<i>Captación de la energía solar</i>	16
2.1.5.	<i>Determinación del ángulo de inclinación</i>	17
2.1.6.	<i>Sistemas fotovoltaicos</i>	18
2.1.7.	<i>Ángulo óptimo de los paneles fotovoltaicos</i>	19
2.1.8.	<i>Sistemas híbridos</i>	20
2.1.9.	<i>Optimizaciones por seguimiento solar</i>	23
2.2.	Marco Conceptual	25
2.2.1.	<i>Unidad astronómica (UA)</i>	25
2.2.2.	<i>Constante Solar</i>	25
2.2.3.	<i>Equinoccios y Solsticios</i>	25
2.2.4.	<i>Hora Solar Pico (HSP)</i>	27
2.2.5.	<i>Efecto fotovoltaico</i>	27
2.2.6.	<i>Célula o celda fotovoltaica</i>	28
2.2.7.	<i>Baterías</i>	29
2.2.8.	<i>Controlador de carga o regulador</i>	30
2.2.9.	<i>Inversor</i>	31
2.2.10.	<i>Eficiencia de Conversión</i>	32
2.2.11.	<i>Optimización de paneles solares</i>	32
2.2.12.	<i>Sostenibilidad Energética</i>	33
2.2.13.	<i>Condiciones climáticas de Piura</i>	33
	Capítulo III. Desarrollo del Trabajo de Investigación	35
3.1.	Zona de estudio.....	35
3.1.1.	<i>Datos geográficos</i>	35
3.1.2.	<i>Datos de irradiación solar</i>	36

3.2.	Descripción del sistema fotovoltaico	39
3.2.1.	<i>Tipos de módulos fotovoltaicos</i>	39
3.2.2.	<i>Datos de los paneles solares</i>	41
3.2.3.	<i>Pérdidas del sistema</i>	42
3.2.4.	<i>Tipo de campo de instalación</i>	44
3.2.5.	<i>Ángulo azimutal</i>	44
3.2.6.	<i>Ángulo de inclinación del panel</i>	44
3.2.7.	<i>Eficiencia del sistema</i>	45
3.3.	Efecto de la temperatura en los PV	45
3.4.	Refrigeración de las celdas solares	47
3.5.	Optimización por sistema de seguimiento solar	49
3.6.	Optimización por sistema híbrido	53
3.6.1.	<i>Características del sistema térmico</i>	53
3.6.2.	<i>Cálculo de eficiencias</i>	54
3.7.	Optimización por sistema híbrido con seguidor solar	57
	Capítulo IV. Resultados, Contrastación de Hipótesis y Discusión	60
4.1.	Análisis de las limitaciones del software	60
4.2.	Análisis de los resultados de la optimización con seguidor solar	61
4.2.1.	<i>Radiación incidente</i>	61
4.2.2.	<i>Discusión de la implementación</i>	63
4.2.3.	<i>Análisis del impacto ambiental</i>	64
4.3.	Análisis de los resultados del sistema híbrido PVT	65
4.3.1.	<i>Parámetros térmicos</i>	65
4.3.2.	<i>Eficiencia energética</i>	67
4.3.3.	<i>Discusión sobre la implementación</i>	69
4.3.4.	<i>Análisis de impacto ambiental</i>	70
4.4.	Análisis de la implementación de un sistema híbrido con seguidor solar	70
4.5.	Análisis económico	71

4.5.1. Seguidor solar.....	71
4.5.2. Sistema híbrido PVT.....	72
4.5.3. Comparación entre optimizaciones.....	73
4.6. Discusión sobre las limitaciones de las tecnologías actuales.....	74
4.7. Contrastación de hipótesis.....	75
4.8. Discusión de los resultados	76
Conclusiones	78
Recomendaciones	79
Referencias Bibliográficas	80
Anexos	83

Índice de Tablas

Tabla 1 Variables, dimensiones e indicadores	7
Tabla 2 Datos de temperatura y precipitación de Piura	35
Tabla 3 Datos de irradiación mensual en la ubicación (-5.1889°, -50.661°)	39
Tabla 4 Tabla de eficiencias de celdas solares.....	40
Tabla 5 Perdidas del sistema.....	43
Tabla 6 Incremento de la eficiencia para cada tipo de refrigeración	48
Tabla 7 Datos de energía para paneles fijos a 15° de inclinación	50
Tabla 8 Datos de energía para paneles con seguimiento en 1 eje	51
Tabla 9 Datos de energía para paneles con seguimiento en 2 ejes.....	51
Tabla 10 Porcentaje de mejora de un seguidor solar	53
Tabla 11 Temperatura de salida y calor entregado mensualmente	56
Tabla 12 Parámetros térmicos y eficiencias del sistema híbrido	57
Tabla 13 Irradiación POA (Plane of Array) en sistemas fijos y con seguidores	58
Tabla 14 Energía aprovechada en cada tipo de sistema híbrido.....	59
Tabla 15 Promedio mensual y desviación estándar de la irradiancia POA en los 3 sistemas.....	63
Tabla 16 Promedio mensual y desviación estándar del calor entregado en un sistema híbrido	65
Tabla 17 Promedio mensual y desviación estándar de la temperatura del agua caliente en un sistema híbrido	66
Tabla 18 Promedio mensual y desviación estándar de las eficiencias en un sistema híbrido	68
Tabla 19 Componentes de los seguidores solares	72

Índice de Figuras

Figura 1 Valores de radiación solar en la Tierra y el Sol	12
Figura 2 Inclinação de la elíptica respecto al ecuador celeste.	14
Figura 3 Inclinação de la elíptica respecto al ecuador celeste	15
Figura 4 Ángulos que definen la posición del Sol	16
Figura 5 Relaciones entre los ángulos θ y δ en invierno	17
Figura 6 Relaciones entre los ángulos θ y δ en verano.....	18
Figura 7 Instalación de un sistema fotovoltaico	19
Figura 8 Eficiencia vs. temperatura para diferentes tipos de celdas	21
Figura 9 Esquema de un sistema PV/T con apoyo térmico	21
Figura 10 Diagrama de bloques del control de un seguidor solar	24
Figura 11 Definición gráfica de las Horas Solares Pico.....	27
Figura 12 Elementos del efecto fotovoltaico	28
Figura 13 Funcionamiento de una célula solar	29
Figura 14 Arreglo de baterías de 12V y 1800 Ah.....	30
Figura 15 Ciclo de carga de un regulador de tres etapas.....	31
Figura 16 Inversor fotovoltaico 24 VDC/230VAC 50Hz, 500W	32
Figura 17 Mapa de Piura	34
Figura 18 Gráfico del promedio mensual de la irradiancia durante el día.....	37
Figura 19 Relación entre la temperatura y la potencia de los módulos	46
Figura 20 Función que relaciona la eficiencia eléctrica del panel para distintas temperaturas y bajo condiciones estándar de operación.	47
Figura 21 Incremento de la eficiencia de las tecnologías de refrigeración	48
Figura 22 Radiación incidente POA mensual con diferentes sistemas	61
Figura 23 Porcentaje de mejora de seguidores solares cada mes	62
Figura 24 Calor mensual obtenido por el sistema PVT	65
Figura 25 Temperatura obtenida en el agua entregada por el sistema PVT	66

Figura 26 Gráfico de la eficiencia total mensual de un sistema híbrido67

Capítulo I. Generalidades

1.1. Antecedentes de la Investigación

1.1.1. *Antecedentes Internacionales*

Gonzales¹ presenta un trabajo relacionado a la optimización realizada en una instalación de paneles solares híbridos fotovoltaicos-térmicos, en donde se aprovecha el efecto fotovoltaico para generar electricidad con los paneles solares, y el calor transferido por radiación generado por los rayos solares. En la presente tesis se detalla además como influye la temperatura en el rendimiento de los paneles solares, así como los efectos al colocar cierto aislamiento térmico en la parte trasera de estos (González Peña, 2019).

Soomar² et al. realiza un artículo en donde se analizan los avances más actuales en dispositivos de generación de energía eléctrica y térmica a partir de la energía solar con el fin de proporcionar una referencia para los tomadores de decisiones en el campo de la construcción de plantas solares en todo el mundo. Con base en esta investigación, es posible inferir que los objetivos principales de los enfoques de optimización son reducir los costos de inversión, operación y mantenimiento, y las emisiones para mejorar la confiabilidad del sistema. Este documento también incluye una breve descripción general de varios problemas y cuestiones de optimización de la energía solar (Soomar et al., 2022).

¹ González Peña, D. (2019). Optimización del diseño de panel solar híbrido para edificación [Tesis de Posgrado, Universidad de Burgos]. <https://doi.org/10.36443/10259/5399>.

² Soomar, A. M., Hakeem, A., Messaoudi, M., Musznicki, P., Iqbal, A., & Czapp, S. (2022). Solar Photovoltaic Energy Optimization and Challenges. *Frontiers in Energy Research*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.879985>.

Gomes et al.³ estudia un caso en la ciudad de Rio de Janeiro en donde se analiza el ángulo óptimo de los paneles fotovoltaicos, en donde este nos entrega la máxima potencia. En este trabajo también se consideran efectos perjudiciales para el sistema, tales como el polvo, suciedad, gotas de agua y otros efectos atmosféricos. La metodología empleada en este estudio consiste en estimar la incidencia solar sobre la superficie de los paneles fotovoltaicos mediante la ecuación propuesta por los autores, que considera la latitud y la longitud del lugar de instalación del panel. Los resultados obtenidos fueron validados utilizando un software que genera datos horarios de radiación solar (Gomes et al., 2023).

En el resumen del informe del IPCC⁴ (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático) emitido en el 2023 se menciona que el plan para las reducciones de emisiones alberga sistemas de energía renovable, así como el desarrollo de tecnologías de bajo impacto ambiental. Entre las energías renovables, se muestra en mayor medida el gran potencial que posee aún la energía solar como factor reductor de emisiones, seguido de la energía eólica (IPCC, 2023).

1.1.2. Antecedentes Nacionales

Jalca et al.⁵ nos muestra el análisis energético de un sistema híbrido PVT (fotovoltaico-térmico) en el cual se han considerado las condiciones climatológicas de

³ Gomes, A., do Nascimento Oliveira, M. F., & Musci, M. (2023). Optimal Tilt Angle of Photovoltaic Panels: A Case Study in the City of Rio de Janeiro. 12(2). <https://doi.org/10.5296/emsd.v12i2.20992>.

⁴ IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, doi:10.1017/9781009157896.001.

⁵ Jalca Cabañas, E., Espinoza Canaza, F., Gosgot Angeles, W., & Rivera López, R. Y. (2022). Análisis energético de un sistema híbrido fotovoltaico-térmico bajo las condiciones climáticas de Chachapoyas, Amazonas, Perú. Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable, 6(1), 66-73. <https://doi.org/10.25127/aps.20221.856>.

Chachapoyas. En este estudio se propone un sistema híbrido PVT que puede aprovechar de mejor manera la radiación solar (Jalca Cabañas et al., 2022).

Siuce⁶ realizó un trabajo de investigación titulado “Ángulo de inclinación óptimo para incrementar la potencia eléctrica de generación del panel solar fotovoltaico de la Universidad Nacional del Centro del Perú”, en el que hace uso de sensores para medir la intensidad de la irradiancia solar, además de registrar los datos de temperatura. Sin embargo, demuestra que: “Los factores geográficos basados en corrección del ángulo de inclinación son útiles para indicar el ángulo de inclinación a instalar un sistema fotovoltaico, sin la necesidad de utilizar sensores durante un periodo de tiempo” (Siuce, 2022).

Atarama⁷ hace uso de distintas herramientas para evaluar el potencial energético que posee la región Piura para generar energía eléctrica a partir de paneles fotovoltaicos, y llegó a la conclusión de que efectivamente es una alternativa viable para la construcción de proyectos de energía solar, y así evitar la emisión de gases de efecto invernadero que ocasionan serios daños al planeta y a la economía. También determinó que: “El promedio de energía solar incidente en las provincias estudiadas es de 5 kWh/m².día y que la provincia con mayor potencial para la instalación de paneles fotovoltaicos es Huancabamba, donde el promedio es 3.7 kWh/m².día al año y las temperaturas no sobrepasan los 25 °C” (Atarama Montero, 2019).

⁶ Siuce, E. (2022). Ángulo de inclinación óptimo para incrementar la potencia eléctrica de generación del panel solar fotovoltaico de la Universidad Nacional del Centro del Perú [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/8318>.

⁷ Atarama Montero, N. H. (2019). Evaluación del potencial de energía solar para generación de energía eléctrica, como una alternativa para disminuir el uso de combustibles fósiles en la región Piura [Tesis de Posgrado, Universidad Nacional de Piura]. <https://repositorio.unp.edu.pe/handle/UNP/1813>.

1.2. Identificación y Descripción del Problema de Estudio

El consumo energético global ha crecido exponencialmente debido a tecnologías avanzadas y actividades humanas intensivas en carbono. Este crecimiento está vinculado a la quema de combustibles fósiles, principal fuente de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), que incrementan las temperaturas globales y provocan fenómenos climáticos extremos (IPCC, 2021). Según el IPCC, limitar el calentamiento global a 1.5 °C requiere transiciones rápidas hacia sistemas energéticos de bajas emisiones, aunque las brechas financieras y políticas dificultan esta transición.

En cuanto a la optimización de los sistemas fotovoltaicos, existen dos características principales que afectan el rendimiento: el ángulo de inclinación y la refrigeración de los paneles fotovoltaicos.

En primer lugar, los paneles solares tradicionales (sin seguimiento solar) no aprovechan toda la radiación incidente del lugar, debido a que estos poseen un ángulo de inclinación fijo, lo que reduce la captura de energía. Las investigaciones realizadas por Pacheco et al.⁸, correspondientes a ello, demostraron que el uso de sistemas de seguimiento solar puede incrementar la captación hasta un 35% en comparación con paneles fijos, lo que se puede interpretar como una evidencia de las pérdidas de energías que se producen en los diseños básicos (Pacheco et al., 2020).

En segundo lugar, el sobrecalentamiento de los paneles solares es otro desafío crítico que reduce significativamente su eficiencia. Los paneles alcanzan temperaturas elevadas de unos 55°C en algunos casos estudiados, y en otros casos de 59.27°C en zonas áridas bajo exposición solar intensa, disminuyendo su rendimiento eléctrico. Investigaciones muestran que la implementación de métodos de enfriamiento, como

⁸ Pacheco, M., Tapia, I., & Guevara, E. (2020). Diseño e implementación de un seguidor solar de un eje para la optimización de un sistema fotovoltaico de 100 W aplicando cálculos matemáticos y automatización industrial. 4(3), 336-354. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v4i3.1359>.

sistemas de agua o aire, puede aumentar la eficiencia eléctrica de los paneles solares (Linares Rojo, 2022)⁹.

1.3. Formulación del Problema

1.3.1. Problema General

¿Qué tan factible será la implementación de los sistemas de seguimiento solar y los paneles híbridos fotovoltaicos-térmicos para un sistema fotovoltaico considerando las condiciones climáticas de la ciudad de Piura?

1.3.2. Problema Específico

¿Entre los sistemas de seguimiento solar y los paneles híbridos fotovoltaicos-térmicos, cual mejora realizada a la instalación de paneles fotovoltaicos es la que más repercute positivamente en la eficiencia de dicho sistema?

¿En qué medida los cálculos y formulación de la solución nos permitirá desarrollar un riguroso análisis de las mejoras realizadas a los diferentes parámetros en un sistema fotovoltaico mediante la implementación de sistemas de seguimiento solar y paneles híbridos fotovoltaicos-térmicos?

1.4. Justificación e importancia

El cambio climático y la creciente demanda de energía a través de los años nos obligan a buscar soluciones sostenibles que puedan reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y hagan uso de recursos renovables de manera eficiente. La energía solar es una de las alternativas más prometedoras para satisfacer estas necesidades, pero su aprovechamiento sigue siendo un desafío debido a limitaciones tecnológicas y contextuales, como el impacto del clima local en el rendimiento de los paneles solares y la ubicación geográfica (IPCC, 2021).

⁹ Linares Rojo, F. D. (2022). Efecto de la temperatura en paneles solares fotovoltaicos y tecnologías de refrigeración para el mejoramiento de la eficiencia [Tesis de Pregrado, Instituto Tecnológico Metropolitano]. <https://repositorio.itm.edu.co/handle/20.500.12622/5727>

Piura, con su clima cálido, seco y tropical, ofrece condiciones óptimas de radiación solar, pero también plantea retos debido a las altas temperaturas, que pueden reducir la eficiencia de los paneles solares. Por lo tanto, es fundamental investigar qué estrategias de optimización propuestas en la literatura científica son más efectivas en este contexto específico. De esta manera, también se contribuirá al desarrollo de soluciones energéticas adaptadas para operar en regiones con condiciones climáticas similares.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Analizar energéticamente la eficiencia de los sistemas de seguimiento solar y los paneles híbridos fotovoltaicos-térmicos, usando las condiciones climatológicas de la ciudad de Piura.

1.5.2. Objetivos Específicos

Formar relaciones entre los parámetros que corresponden al diseño de paneles fotovoltaicos nos puedan representar su grado de impacto en la potencia eléctrica entregada.

Determinar el nivel de impacto de las condiciones climatológicas de Piura a la eficiencia de los sistemas PV.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis General

Los métodos usados nos ayudarán a mejorar la eficiencia energética de los sistemas fotovoltaicos que se puedan instalar en la ciudad de Piura.

1.6.2. Hipótesis Específicas

Los modelos que se estudiarán nos permitirán conocer el grado de eficiencia aportado por cada uno de ellos.

El análisis que se realizará a cada propuesta de optimización nos brindará información respecto a los parámetros más relevantes en el diseño de sistemas fotovoltaicos.

1.7. Variables y Operacionalización de variables

1.7.1. Operacionalización de variables

Tabla 1

Variables, dimensiones e indicadores

Variables	Dimensiones	Indicadores
VI: Método de Optimización	Conceptos de diseño.	Tipo de diseño del sistema fotovoltaico (simple, híbrido)
	Tipo de material.	Tipo de celda fotovoltaica (monocristalina, policristalina, etc.)
	Implementación de técnicas de enfriamiento	Disminución de la temperatura de operación.
	Implementación de técnicas de seguimiento solar.	Angulo de inclinación del panel.
VD: Eficiencia energética	Rendimiento energético	Porcentaje de eficiencia.
		Relación kWh generados por m ² de panel instalado.
	Comportamiento debido a la temperatura.	Variación de eficiencia por temperatura.

1.8. Metodología de la Investigación

1.8.1. Unidad de análisis

El presente trabajo se realizará tomando en cuenta las condiciones climáticas de la ciudad de Piura, el cual posee un clima tropical seco y ubicado cerca de la línea ecuatorial. Las temperaturas máximas y mínimas alcanzadas son 34.2°C y 15°C respectivamente, y la humedad promedio es de 66%.

El análisis que se va a realizar corresponde al presente año 2024, en el cual se tomarán las estrategias de optimización más recientes y las más usadas.

1.8.2. Tipo, enfoque, nivel de la investigación

La investigación tiene un enfoque cuantitativo y es del tipo aplicado. Posee un alcance descriptivo-comparativo, ya que se analizarán las propuestas de optimización de paneles solares realizadas por otros autores, y se contextualizarán bajo las condiciones climáticas específicas de Piura.

1.8.3. Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación es no experimental, transversal, dado que se analizarán datos existentes en un tiempo determinado y sin manipular las variables.

1.8.4. Fuentes de información

Las fuentes fueron obtenidas de diversos sitios de acceso libre tales como Google Scholar¹⁰ y DOAJ¹¹, y presencialmente se visitó la Biblioteca Central de la Universidad Nacional de Ingeniería.

¹⁰ Google Scholar es un motor de búsqueda especializado en documentos académicos. URL: <https://scholar.google.com>

¹¹ DOAJ (Directory of Open Access Journals) es un Directorio online de revistas científicas de acceso abierto. URL: <https://www.doaj.org>

1.8.5. Población y Muestra

En el presente estudio, la población está definida por todos los sistemas fotovoltaicos que podrían ser implementados en la ciudad de Piura, incluyendo paneles solares convencionales, con seguidores solares y sistemas híbridos fotovoltaico-térmicos (PV-T).

Dado que la investigación se enfoca en estrategias para la optimización, la muestra seleccionada comprende los paneles solares con sistemas de seguimiento solar y los sistemas híbridos PV-T, los cuales serán analizados en términos de eficiencia energética bajo las condiciones climáticas de Piura. La selección de esta muestra está justificada en base a su potencial para mejorar el rendimiento de los paneles solares en climas cálidos y de alta radiación solar, que es el caso de nuestro lugar de estudio

1.8.6. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Se utilizaron los siguientes instrumentos para la recopilación de información: bloc de notas, útiles de escritorio, laptop, computadora de alto rendimiento gráfico para las simulaciones.

1.8.7. Análisis y Procesamiento de Datos

Para evaluar la eficiencia energética de las estrategias de optimización en paneles solares bajo las condiciones climáticas de la ciudad de Piura, se utilizarán datos de radiación solar directa, difusa y global, temperatura ambiente, humedad, velocidad del viento y otras variables meteorológicas relevantes. Estos datos serán obtenidos de fuentes confiables como la data de las estaciones meteorológicas, como es el caso del NREL (National Renewable Energy Laboratory), además de usar datos de la literatura científica.

El procesamiento de datos se realizará a través de simulaciones en softwares especializados en este tipo de trabajos, como el System Advisor Model (SAM), PVsyst o similares, en donde nos permitirán modelar el comportamiento de los paneles solares

con seguidores solares y sistemas híbridos PV-T, y extraer su información relevante para posteriormente procesarlos en aplicaciones de manejo de datos. Se aplicarán cálculos de eficiencia energética, potencia generada y mejoras en el rendimiento en comparación con sistemas convencionales.

Capítulo II. Marco Teórico

2.1. Bases Teóricas

2.1.1. *Energía y radiación solar*

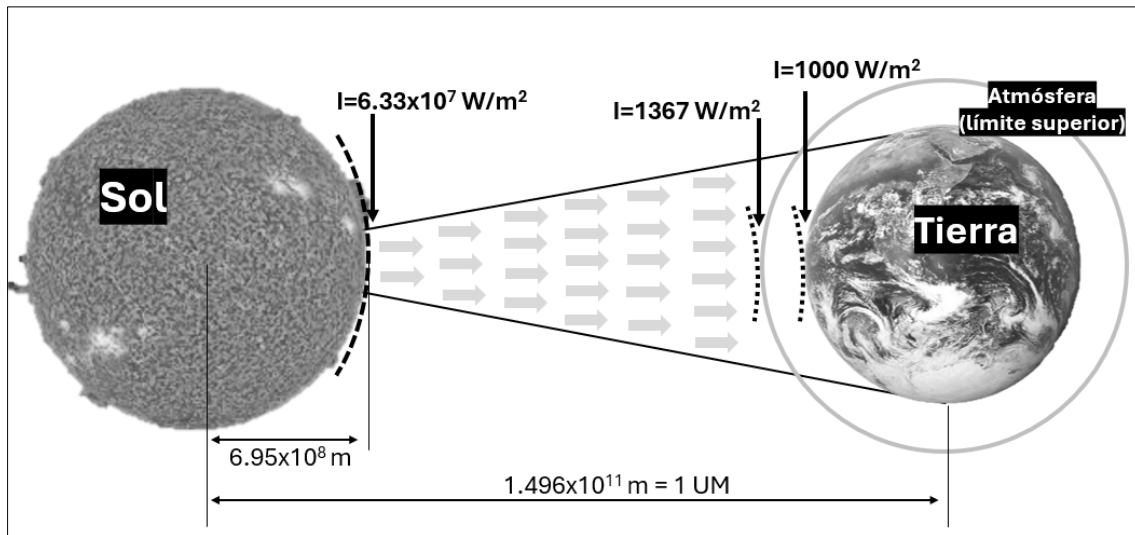
El Sol es la estrella más cercana a la Tierra, y como estrella está compuesta de plasma, por lo que posee un grado de ionización alto. En esta se producen reacciones termonucleares que transforman núcleos de hidrógeno en núcleos de helio, aproximadamente 6×10^{11} kg por segundo. Su composición actual es de 70% de hidrógeno y 28% de helio (más 2% de otros elementos). Esto quiere decir que posee una vida restante aproximadamente igual a su edad, que se estima en 4500 millones de años.

Las reacciones termonucleares son acompañadas de emisiones de ondas electromagnéticas en los alrededores del espacio, cuya potencia total (3.826×10^{26} W) puede considerarse estable. Se sabe que las longitudes de onda de las radiaciones así emitidas por el sol cubren un rango comprendido entre 0.1 nm (1 Angström) y 1000 m, sin embargo, la parte fundamental de la potencia irradiada está comprendida entre 0.25 y 25 μm .

Cuando la tierra se encuentra a una distancia del Sol de 1 UA (unidad astronómica con un valor aproximado de 150 millones de kilómetros), la radiación solar produce sobre el límite superior de la atmósfera una irradiancia total denominada constante solar, de un valor de 1367 Watts por metro cuadrado (W/m^2). Después dicha radiación sufre una segunda pérdida de energía debido a la capa atmosférica, por lo que la radiación en la superficie terrestre es de aproximadamente 1000 W/m^2 .

Figura 1

Valores de radiación solar en la Tierra y el Sol



Nota. La imagen muestra los valores de radiación solar en la Tierra y el Sol, así como las distancias entre algunos puntos, las cuales no están realizadas a escala. La imagen es de elaboración propia.

Se distinguen tres tipos de radiación solar en función de cómo inciden los rayos del sol sobre la Tierra:

- Directa: es la recibida desde el Sol sin que se desvíe en su paso por la atmósfera.
- Difusa: es la que sufre cambios en su dirección principalmente debidos a la reflexión y difusión en la atmósfera.
- Albedo o reflejada: es la radiación directa y difusa que se recibe por reflexión en el suelo u otras superficies próximas.

De entre los tres tipos, la radiación directa es la de mayor intensidad y tiene un rol importante en las aplicaciones fotovoltaicas y fototérmicas. Cuando hay momentos en donde, por procesos meteorológicos, las nubes impiden la radiación solar directa (aunque podría darse el caso de haber otro tipo de objeto impidiendo el paso de los rayos solares), se continúa recibiendo radiación solar sobre la superficie debido a la

radiación difusa. A estos días se les denomina días de escasa radiación solar (Pareja Aparicio, 2010).

Por otro lado, la radiación albedo puede ser despreciada para casos prácticos en donde no existan superficies reflejantes significativas como la nieve, ya que influye en la radiación menos de un 3% (Kreuter et al., 2014)¹².

En consecuencia, la radiación solar total, se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Radiación total} = \text{Radiación directa} + \text{Radiación difusa} \quad \dots (1)$$

El valor de la radiación difusa no solo depende de la intensidad de la fuente, sino también del ángulo de incidencia y reflexión, así como los factores geográficos y la naturaleza del suelo o cuerpo en donde este se verán reflejados los rayos solares. Por ejemplo, la absorción por radiación de la arena es mayor que la nieve, por lo que en este último se reflejarán mucho mejor los rayos solares, y por ende el albedo sería mayor.

2.1.2. Medición de la radiación solar

Para medir la energía de la radiación solar y usar estos valores en los cálculos de dimensionado se usan las unidades de Joule por metro cuadrado (J/m^2), sin embargo, también se usan las unidades de Watts-hora por metro cuadrado (Wh/m^2).

Para obtener un mejor análisis acerca del valor de la energía solar en una determinada zona, se debe tener en cuenta los siguientes conceptos:

Irradiancia: se define como la potencia de la radiación solar que llega a una superficie, o también como la energía solar que incide sobre una unidad de superficie en un tiempo dado, o también como. Se expresa en W/m^2 .

¹² Kreuter et al. Solar irradiance in the heterogeneous albedo environment of the Arctic coast: measurements and a 3-D model study, Atmos. Chem. Phys., 14, 5989–6002, <https://doi.org/10.5194/acp-14-5989-2014>, 2014

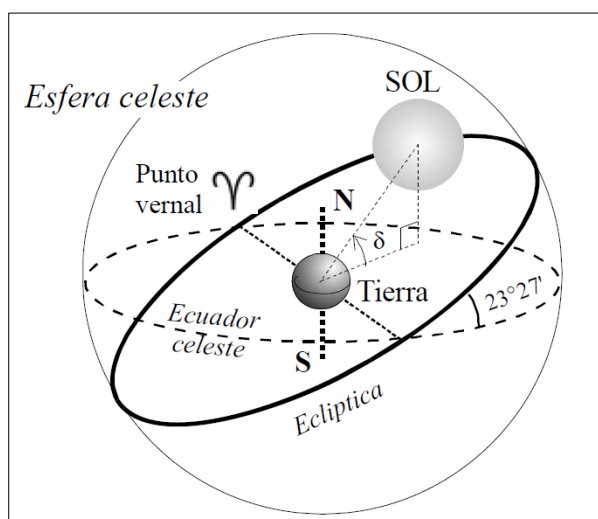
Irradiación: se define como la energía total recibida por unidad de superficie. Se expresa en Joules (energía) por metro cuadrado (J/m^2), aunque también es expresado en Wh/m^2 mediante la conversión de unidades.

2.1.3. Movimiento de la tierra

Se tiene el plano del ecuador de la Tierra, y este corta sobre la esfera celeste, el cual es una denominación que antaño se usaba para referirse a la trayectoria que forman el Sol y las estrellas desde el punto de vista de la Tierra. La intersección resulta en un gran círculo denominado ecuador celeste, que subtiende un ángulo constante de $23^\circ 26,5'$ con el plano de la eclíptica; este ángulo es la oblicuidad de la eclíptica (la eclíptica recibe ese nombre debido a que los eclipses se producen cuando la órbita de la Luna corta al gran círculo del Sol). Cuando el Sol se encuentra en una u otra de las dos intersecciones de la eclíptica y del ecuador celeste, la duración del día iguala al de la noche: son los equinoccios (de primavera y otoño) (Chiron de la Casinière & Cachorro Revilla, 2008).

Figura 2

Inclinación de la elíptica respecto al ecuador celeste.



Nota. Tomado de *La Radiación Solar en el sistema Tierra-Atmósfera* (p. 74) por Chiron de la Casinière & Cachorro Revilla, 2008, Ediciones Universidad de Valladolid.

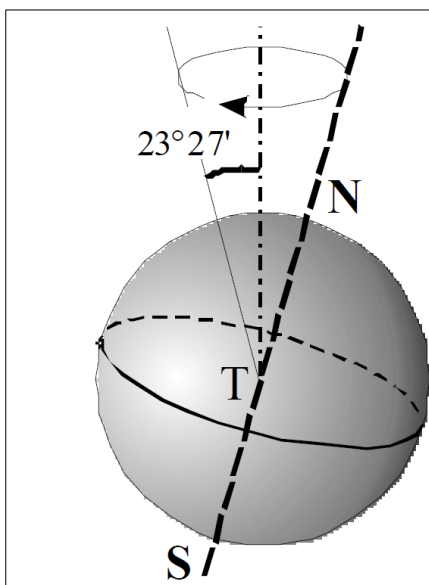
En cuanto al eje de los polos, este está afectado por dos movimientos diferentes, además no se desplaza de forma paralela a sí mismo a lo largo de la órbita terrestre, sino que su ángulo respecto a la vertical varía.

El primero consiste en la acción conjunta de la precesión y la nutación de la Tierra producida por el momento de las fuerzas gravitacionales ejercidas por el Sol, la Luna y los planetas cercanos sobre la Tierra. La precesión consiste en una rotación cónica de $23^{\circ} 26,5'$ de semiángulo del eje vertical de los polos, que se efectúa de Este a Oeste con un periodo de 27 725 años. La nutación es también una rotación cónica de este mismo eje, en conjunto al movimiento anterior, pero de amplitud muy pequeña ($9,2''$) y de muy corto periodo (19 años).

El segundo es el desplazamiento errático del eje que atraviesa el polo Norte y polo Sur geográficos, ya que este no está fijo respecto al suelo. (Chiron de la Casinière & Cachorro Revilla, 2008).

Figura 3

Inclinación de la elíptica respecto al ecuador celeste



Nota. Tomado de *La Radiación Solar en el sistema Tierra-Atmósfera* (p. 75) por Chiron de la Casinière & Cachorro Revilla, 2008, Ediciones Universidad de Valladolid.

2.1.4. Captación de la energía solar

La posición del sol desde el punto de vista de la Tierra, y la trayectoria de su movimiento pueden ser definidos solamente conociendo dos variables angulares: el ángulo azimutal solar y la altura solar. Estos dos valores están referidos al radio vector que une el centro del disco solar y un punto en la superficie terrestre (en donde se tomara de referencia para la medición). En función de la latitud geográfica, pueden conocerse con exactitud en cada instante del año.

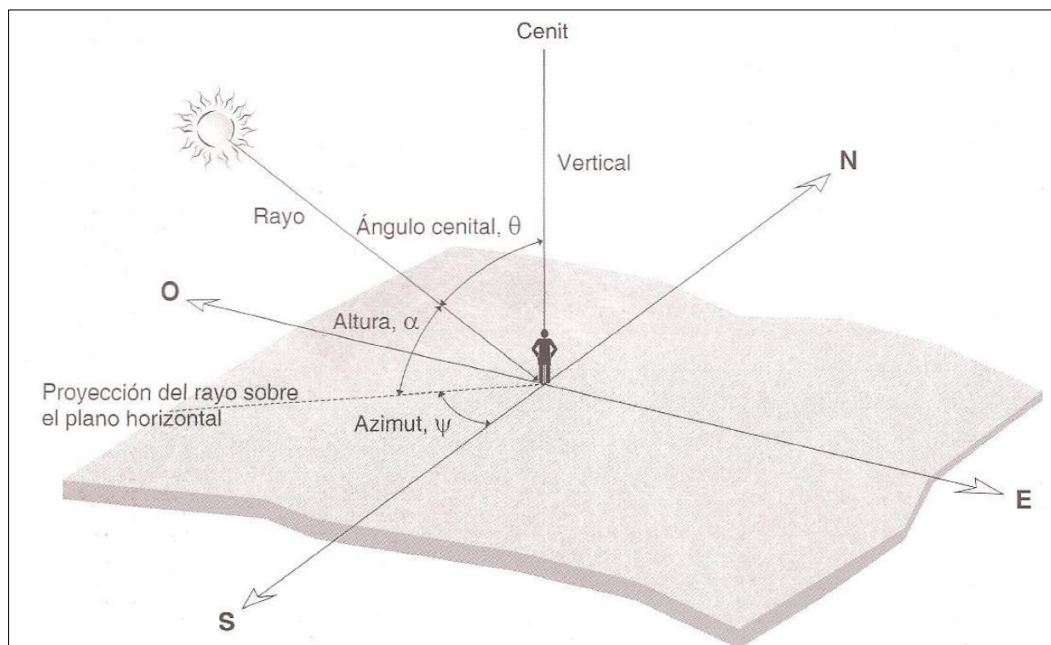
Ángulo azimutal solar o azimut solar (Ψ): Es el ángulo de giro formado por el meridiano del lugar y la proyección del rayo solar sobre el plano horizontal.

Altura solar (α): Es el ángulo formado por el rayo solar y la recta horizontal que va desde el punto considerado hasta el centro del disco solar.

También es importante definir el ángulo cenital (θ), el cual es aquel formado por el rayo solar y la vertical o cenit. (Vera Alvarado, 2014)

Figura 4

Ángulos que definen la posición del Sol



Nota. Tomado de la tesis *Sustentabilidad energética para casas habitación: Energía Solar* (p. 38) por Vera Alvarado, 2014, Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México

2.1.5. Determinación del ángulo de inclinación

En el cálculo del siguiente parámetro se considera que la inclinación del eje de la Tierra interfiere con el ángulo cenital en diversas latitudes. Además de recordar de que la inclinación de este eje es de $23^{\circ}27'$ (23.45° en grados sexagesimales) respecto de la normal del plano de la elíptica. Esto da como consecuencia una mayor elevación del Sol en el cielo en verano, y un descenso en invierno (Siuice, 2022).

El ángulo de desviación del sol respecto a la tierra en el plano ecuatorial está dado por la ecuación (2):

$$\delta = 23.45^{\circ} \cdot \sin \left[\frac{360(J - 80)}{365} \right] \quad \dots (2)$$

“J” Indica el número de orden de los días, considerando J = 1 el primero de enero y tomando a febrero un mes con 28 días, resultando en 365 días al año.

Esta ecuación aproxima la ubicación del Sol en cualquier momento del año, respecto del ecuador.

Figura 5

Relaciones entre los ángulos θ y δ en invierno

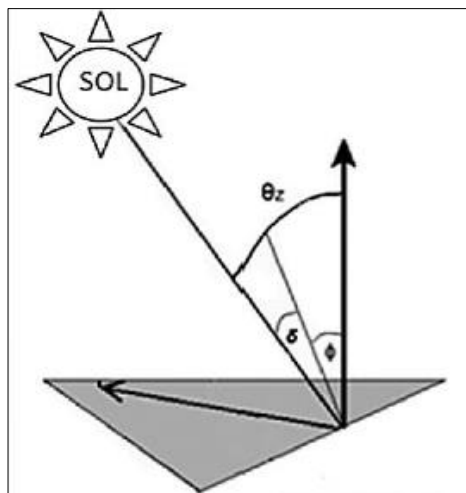
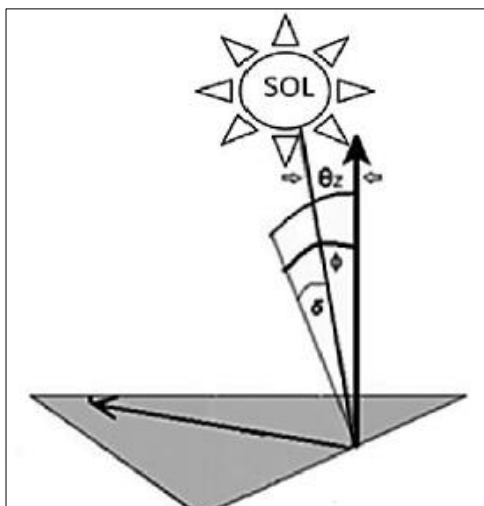


Figura 6

Relaciones entre los ángulos θ y δ en verano



Nota. Las figuras (5) y (6) fueron tomadas de la tesis *Ángulo de inclinación óptimo para incrementar la potencia eléctrica de generación del panel solar fotovoltaico de la Universidad Nacional del Centro del Perú* (p. 36) por Siuce, 2022, Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú.

2.1.6. Sistemas fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos son aquellos que transforman la energía solar en energía eléctrica mediante la captación de los rayos solares y haciendo uso del efecto fotovoltaico para crear una diferencia de potencial eléctrico. Es decir, convierten la energía de un fotón en energía electromotriz.

Dentro de este sistema se hace relevante el concepto: eficiencia de conversión, el cual se refiere al porcentaje de energía solar convertida en electricidad por el panel. Los sistemas convencionales tienen eficiencias típicas entre el 15% y el 20%, limitadas por factores como pérdidas térmicas y ópticas. Por este motivo, aún se realizan estudios para incrementar este parámetro, en donde las soluciones varían dependiendo del contexto en el que se encuentre.

Figura 7

Instalación de un sistema fotovoltaico



Nota. Tomada de la tesis *Evaluación del potencial de energía solar para generación de energía eléctrica, como una alternativa para disminuir el uso de combustibles fósiles en la Piura* (p. 50) de Atarama Montero, 2019, Tesis de posgrado, Universidad Nacional de Piura.

2.1.7. Ángulo óptimo de los paneles fotovoltaicos

A continuación, se propone la ecuación (3) y (4) justificada por Gomes (2023)¹³, en donde en esta última se considera la longitud y latitud al momento de ajustar el ángulo óptimo de inclinación del panel solar. Esta ecuación (4) es una propuesta en contraposición a la ecuación (3), una más simple en donde solamente se usa la latitud como variable.

$$I = \varphi + \frac{\varphi}{3} \quad \dots (3)$$

I: Inclinación del panel solar (en grados)

φ : Latitud (en grados)

$$|M| = \frac{\left(\varphi + \frac{\varphi}{3}\right) + \left(L - \frac{L}{3}\right)}{2} \quad \dots (4)$$

¹³ Gomes, A., do Nascimento Oliveira, M. F., & Musci, M. (2023). Optimal Tilt Angle of Photovoltaic Panels: A Case Study in the City of Rio de Janeiro. 12(2). <https://doi.org/10.5296/emsd.v12i2.20992>

M: Media angular anual (en grados)

ϕ : Latitud (en grados)

L: Longitud (en grados)

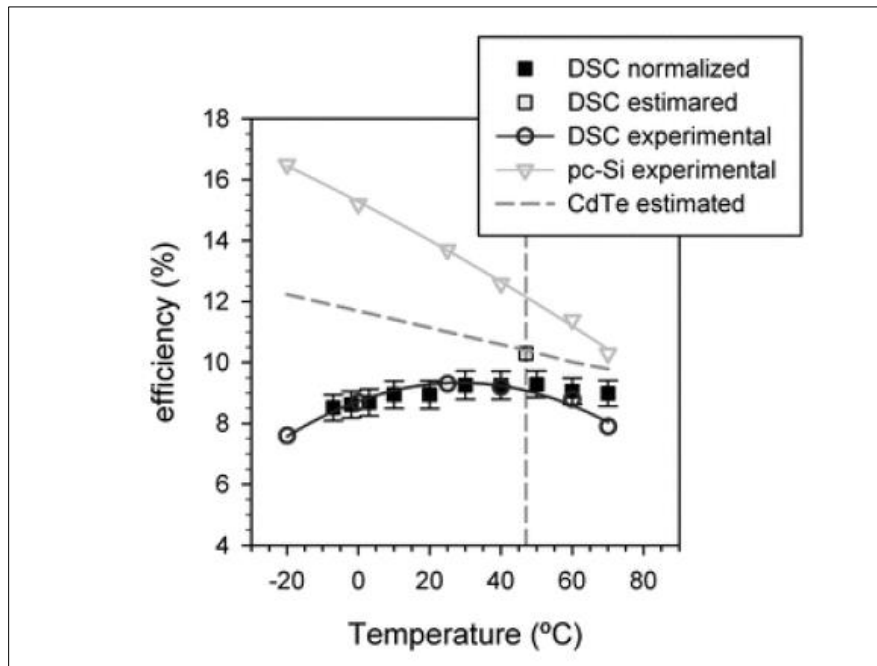
2.1.8. Sistemas híbridos

Los sistemas fotovoltaicos (PV) simples no poseen una eficiencia muy alta por lo general, y es que uno de los problemas que más afectan a la eficiencia de conversión es que parte de la energía solar incidente es convertida en calor residual, lo que a su vez incrementa la temperatura de la célula fotovoltaica, lo que ocasiona una disminución en la eficiencia y en su vida útil. Por este motivo, resulta entonces imprescindible eliminar el calor residual.

En la tecnología híbrida térmica y fotovoltaica (PV/T) se combinan generación eléctrica por efecto fotovoltaico y transferencia de calor por radiación solar, alcanzando eficiencias totales superiores al 65%. Los módulos que componen a este tipo de sistemas consisten en la implementación de un absorbedor térmico en su cara posterior, en donde este nos brinda dos funciones: refrigerar la célula y recoger la energía térmica acumulada para posteriores aplicaciones.(González Peña, 2019).

Figura 8

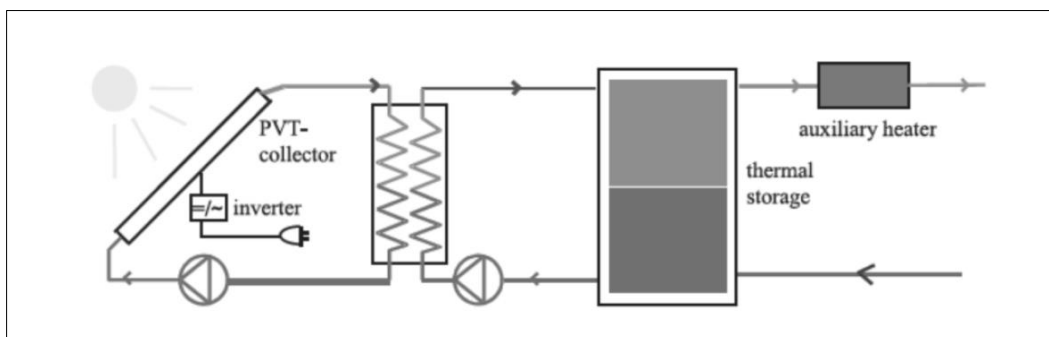
Eficiencia vs. temperatura para diferentes tipos de celdas



Nota. Tomado de la tesis *Optimización del diseño de panel solar híbrido para edificación* (p. 33) por Gonzales Peña, 2019, Tesis de posgrado, Universidad de Burgos.

Figura 9

Esquema de un sistema PV/T con apoyo térmico



Nota. Tomado de la tesis *Optimización del diseño de panel solar híbrido para edificación* (p. 35) por Gonzales Peña, 2019, Tesis de posgrado, Universidad de Burgos.

Existen diversos tipos de sistemas híbridos en donde se usan diferentes elementos para la refrigeración. Por ejemplo, los PV/T refrigerados por aire son los más

simples. Si la circulación del aire se realiza por convección natural, se habla de un sistema pasivo; y si se fuerza la circulación mediante un mecanismo, sería un sistema activo.

El segundo tipo serían los PV/T refrigerados por líquido, en donde usualmente se usa agua. En esta configuración se usan colectores de tubos por donde se conduce el fluido, y se usan diferentes geometrías específicas para el diseño.

Por último, existen paneles híbridos mixtos, en donde se usa tanto el aire como el líquido, sin embargo, presenta diversas dificultades en su construcción por lo que actualmente no es una solución muy viable.(González Peña, 2019).

En cuanto a la evaluación energética que se realiza, se tomará en cuenta los trabajos experimentales realizados por González Peña¹⁴.

La eficiencia eléctrica se calcula de la siguiente manera:

$$n_{elec} = \frac{P_{elec}}{G \cdot A_{panel}} \quad \dots (5)$$

En donde P_{elec} es la potencia eléctrica en la salida del panel, G es la irradiancia solar (W/m^2) y A_{panel} es el área del panel.

Por otro lado, la potencia térmica útil aprovechada es calculada usando la diferencia de temperatura del agua en la entrada y la salida.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{salida} - T_{entrada}) \quad \dots (6)$$

En donde $\dot{m}$ es el flujo másico (kg/s); c_p es el calor específico del agua ($kJ/kg.K$); T_{salida} y $T_{entrada}$ son las temperaturas del agua en la salida y en la entrada (K) respectivamente.

Obteniendo este valor, podemos hallar la eficiencia térmica del sistema, en donde se usa como denominador a la irradiancia solar. A pesar de que la transferencia de calor hacia el agua es directamente realizada por conducción (debido al contacto con el panel), si vemos al panel híbrido PVT como un sistema térmico en su conjunto, nos

¹⁴ González Peña, D. (2019). Optimización del diseño de panel solar híbrido para edificación [Tesis de Posgrado, Universidad de Burgos]. <https://doi.org/10.36443/10259/5399>

daremos cuenta de que la fuente real proviene de la radiación solar, por lo que la eficiencia térmica del sistema (n_t) se calculará de la siguiente manera.

$$n_t = \frac{\dot{Q}}{G \cdot A_{panel}} \quad \dots (7)$$

Resumiendo, un sistema híbrido PVT se tienen 2 eficiencias: la eficiencia térmica y la eficiencia eléctrica. Sin embargo, en el presente trabajo, este sistema se lo estará considerando como una unidad integrada, en donde se obtiene energía eléctrica y energía térmica a partir de una sola fuente: radiación solar. Por lo tanto, es posible definir la eficiencia total del sistema mediante la siguiente expresión.

$$n_{total} = \frac{E_{eléctrica} + E_{térmica}}{E_{solar}} \quad \dots (8)$$

Si descomponemos, nos queda la eficiencia total como una suma de la eficiencia eléctrica y eficiencia térmica

$$n_{total} = n_{eléctrica} + n_{térmica} \quad \dots (9)$$

Esta forma de representar la eficiencia de todo el sistema es muy usada para este tipo de casos, por ejemplo, en el estudio realizado por Gonzalez Peña¹⁵ para paneles híbridos PVT. Sin embargo, se debe tener en cuenta que esta suma no implica una equivalencia entre la energía eléctrica y la energía térmica, ya que no poseen la misma calidad termodinámica. Se optó por usar esta representación debido a su claridad en los resultados para las aplicaciones prácticas.

2.1.9. Optimizaciones por seguimiento solar

El seguimiento solar se realiza en un eje, siguiendo el movimiento del sol durante el día, desde que sale del Este hasta que se oculta en el Oeste. De esta manera se logra la captar eficientemente la radiación solar incidente, además de que nos permite visualizar los parámetros de orientación del sistema como el ángulo azimutal y ángulo de elevación solar, y también parámetros eléctricos como la corriente, voltaje y potencia

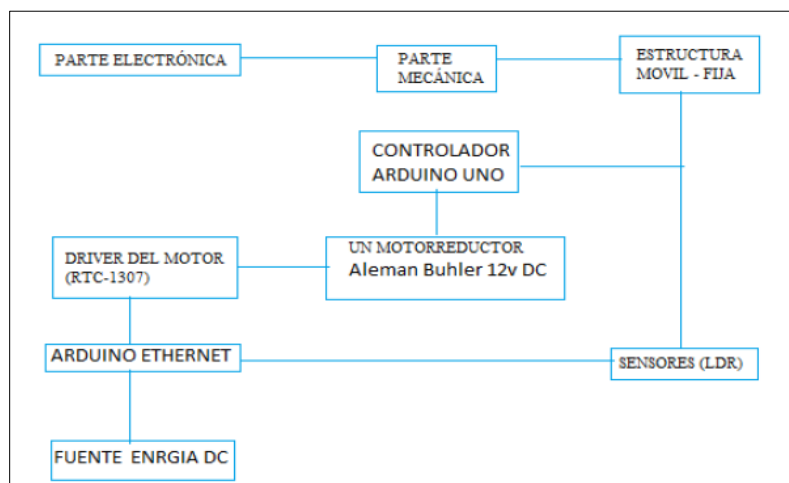
¹⁵ González Peña, D. (2019). Optimización del diseño de panel solar híbrido para edificación [Tesis de Posgrado, Universidad de Burgos]. <https://doi.org/10.36443/10259/5399>

nominal entregada. Esta optimización se realiza con la implementación de un controlador, una interfaz humano-máquina (HMI), sensores, entre otros elementos.

La finalidad es ajustar el ángulo del panel para maximizar la exposición solar durante el día, aumentando la eficiencia entre un 8% y un 35% en comparación con sistemas fijos (Pacheco et al., 2020).

Figura 10

Diagrama de bloques del control de un seguidor solar



Fuente. Diseño e implementación de un seguidor solar de un eje para la optimización de un sistema fotovoltaico de 100 W aplicando cálculos matemáticos y automatización industrial (p. 343) por M. Pacheco Cunduri, 2020, Ciencia Digital, 4(3).

Como parte del diseño de la estructura metálica que forma parte del sistema de seguimiento solar, se realiza un análisis matemático de los factores meteorológicos del lugar en donde se montarán los elementos. Asimismo, se realiza un cálculo de resistencia de materiales y un análisis estático de la estructura, de modo que pueda soportar el peso de todos los componentes y resistir la corrosión del lugar y las deformaciones por las altas temperaturas.

Como punto a tomar en cuenta, en este tipo de sistema, el algoritmo de programación utilizado es un algoritmo de programación astronómica el cual es también conocido como algoritmo de programación cronológica. Consiste en un funcionamiento continuo del motor que controla la inclinación del panel, desde que sale el sol hasta que

se oculta, en donde en este último punto, se envía una señal para que el sistema vuelva a la posición de 0°, y posteriormente permanecer en pausa hasta el día siguiente.

La interfaz humano-máquina sirve principalmente para la supervisión de las variables y los parámetros durante las 12 horas en donde se aprovecha la energía solar. También posee actuadores para poder ejecutar el funcionamiento del seguidor solar o para detenerlo.

2.2. Marco Conceptual

2.2.1. Unidad astronómica (UA)

Es una unidad de longitud usada en astronomía definida por la Unión Astronómica Internacional. Equivale aproximadamente a la distancia media entre la Tierra y el Sol.

$$1UA = 149\,597\,870\,700 \text{ metros} \approx 149.6 \cdot 10^9 \text{ metros} \quad \dots (10)$$

2.2.2. Constante Solar

Según la Organización Meteorológica Mundial, la constante solar se define como el promedio anual de la irradiancia solar total medida en la parte externa de la atmósfera terrestre, cuyo valor es el siguiente:

$$I_0 = 1367 \frac{W}{m^2} \quad \dots (11)$$

2.2.3. Equinoccios y Solsticios

El cambio de las estaciones se debe principalmente a la inclinación del eje de rotación de la Tierra respecto del plano de la órbita. Esto hace que los rayos del Sol incidan de diferente manera en cada hemisferio.

Debido a esto, cuando la Tierra realiza su órbita alrededor del Sol se producen cuatro momentos importantes durante el año (Atarama Montero, 2019).

- Solsticio de junio: Comienza el 21 de junio. El hemisferio norte se inclina hacia la dirección del Sol, por lo que los rayos solares inciden de manera más perpendicular en este, resultando en una mayor cantidad de energía solar

recibida diaria y en una menor duración de las noches. En contraposición, el hemisferio sur posee una menor duración en sus horas de luz solar, y una mayor duración en las noches. Para el norte se produce el verano; y para el sur, el invierno.

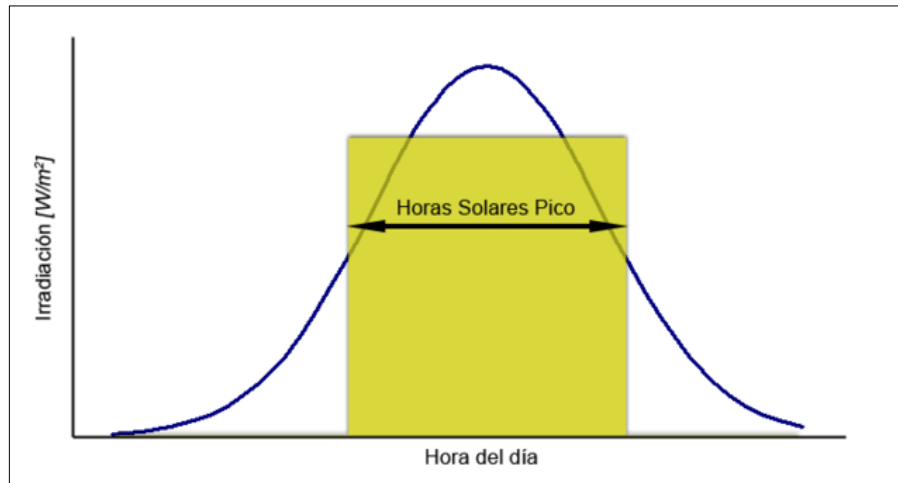
- Equinoccio de septiembre: Comienza el 22 de setiembre. Los días y las noches poseen la misma duración en ambos hemisferios, ya que el Sol se sitúa en la vertical del ecuador. Para el norte se produce el otoño; y para el sur, la primavera.
- Solsticio de diciembre: Comienza el 21 de diciembre. El hemisferio sur se inclina hacia la dirección del Sol, y se invierten los papeles sucedidos en el solsticio de junio. Para el norte se produce el invierno; y para el sur, el verano.
- Equinoccio de marzo: Comienza el 21 de marzo. Los días y las noches poseen la misma duración en ambos hemisferios, ya que el Sol se sitúa en la vertical del ecuador. Para el norte se produce la primavera; y para el sur, el otoño.

2.2.4. Hora Solar Pico (HSP)

Se puede definir como el tiempo teórico diario, en horas, en el que se considera que existe una irradiancia solar de 1 000 W/m².

Figura 11

Definición gráfica de las Horas Solares Pico



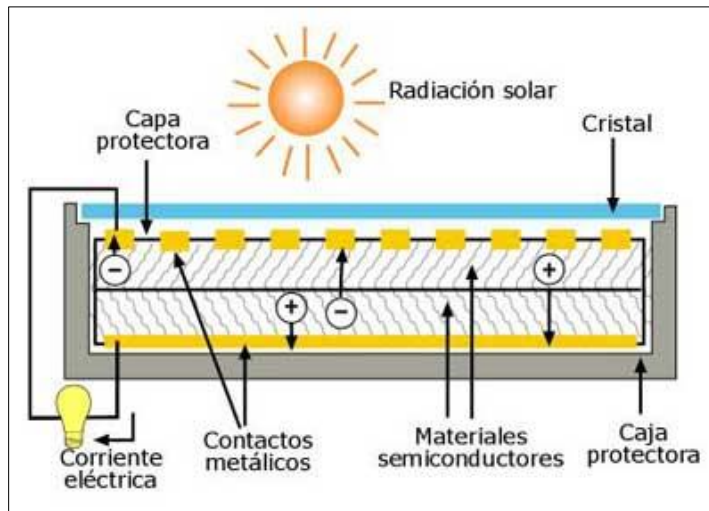
Nota. Tomado de *Renewable Energy & Technology* por Jorge Alarcón, 2021.

2.2.5. Efecto fotovoltaico

Es un fenómeno físico que nos permite transformar la energía solar en energía eléctrica mediante la conversión de la energía del fotón que conforma la luz solar en energía electromotriz. Esto se logra gracias al cambio de propiedades eléctricas que sufren algunos materiales semiconductores (como el silicio) para generar una diferencia de potencial eléctrico y generar un flujo de electrones a través de sus polos.

Figura 12

Elementos del efecto fotovoltaico



Nota. Tomado de www.canaltic.com/blog/html/exe/energias/energa_solar_fotovoltaica

2.2.6. Célula o celda fotovoltaica

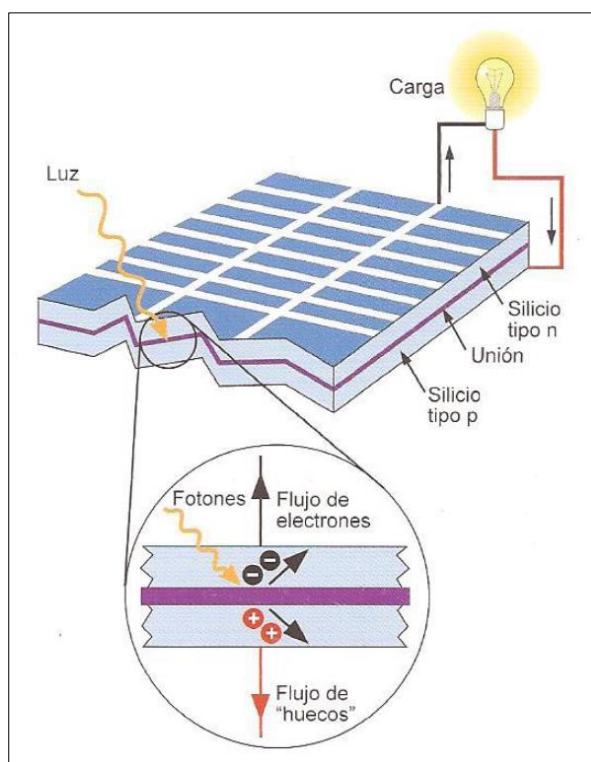
Desde hace más de un siglo ya se conocía el fenómeno físico que consiste en la alteración de las propiedades eléctricas de un material mediante la exposición a la radiación. Por ello, a través de los años han ido usando y perfeccionando los captadores de radiación solar llamados celdas solares o fotovoltaicas.

Su funcionamiento consiste en la presencia de dos semiconductores de diferente polaridad, uno tipo "n" y otro tipo "p". Posteriormente los fotones transfieren la energía a sus electrones, lo que origina una ruptura en la red cristalina a la que estaban unidos. Ahora, debido a la diferencial de potencial existente en las proximidades de la unión NP existirá un flujo ordenado de electrones y huecos fotogenerados, causando una diferencia neta de potencial en la célula.

Mediante los contactos de la célula se puede conectar un circuito exterior, la cual entregará potencia eléctrica útil y circulará la corriente eléctrica (Vera Alvarado, 2014).

Figura 13

Funcionamiento de una célula solar



Nota. Tomado de la tesis *Sustentabilidad energética para casas habitación: Energía Solar* (p. 47) por Vera Alvarado, 2014, Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México.

Las celdas solares pueden tener diferentes materiales semiconductores y diferentes estructuras internas en su fabricación, por lo que estos pueden clasificarse de diferentes maneras: silicio monocristalino, silicio policristalino, celdas compuestas, silicio amorfo, etc. Sin embargo, las más usadas son las celdas solares de silicio monocristalino y policristalino, en donde entre estas dos, la primera es la que más eficiencia posee, aunque posee un costo un poco más elevado.

2.2.7. Baterías

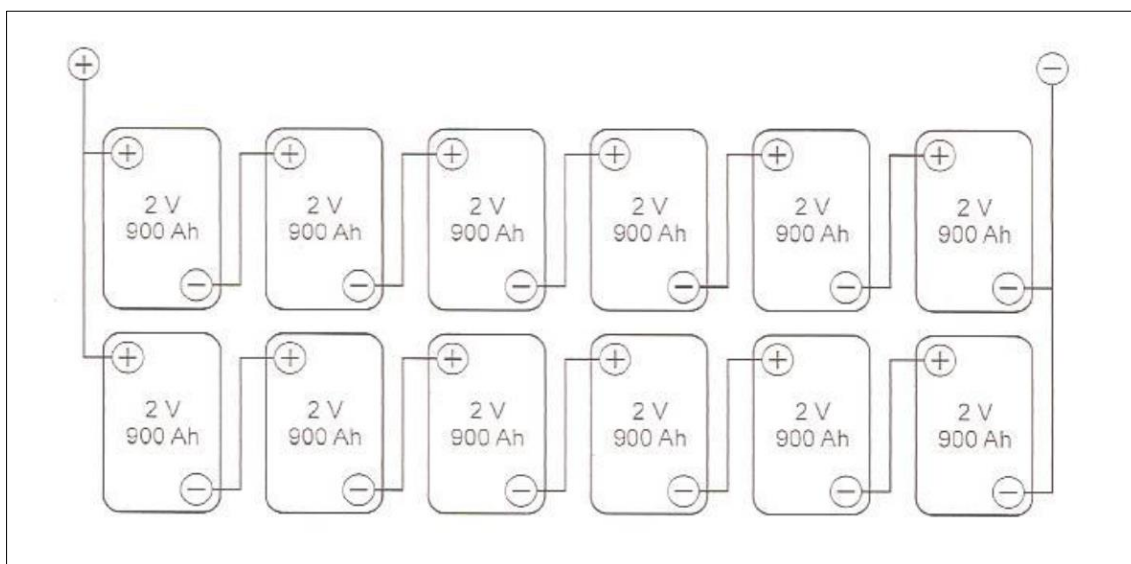
El valor de la radiación no es constante, por lo que el consumo de energía también varía. Por ello se usan dispositivos de almacenamiento de carga, de esta manera nos aseguramos de cumplir con la demanda. Los arreglos de baterías se

realizan con conexiones en serie y paralelo, esto dependerá de la tensión y la corriente eléctrica requerida.

La mayor parte de los sistemas solares están diseñados con baterías de tipo Plomo-acido (Pb-Ac), seguido de baterías de Níquel-Cadmio (Ni-Cd). (Vera Alvarado, 2014)

Figura 14

Arreglo de baterías de 12V y 1800 Ah



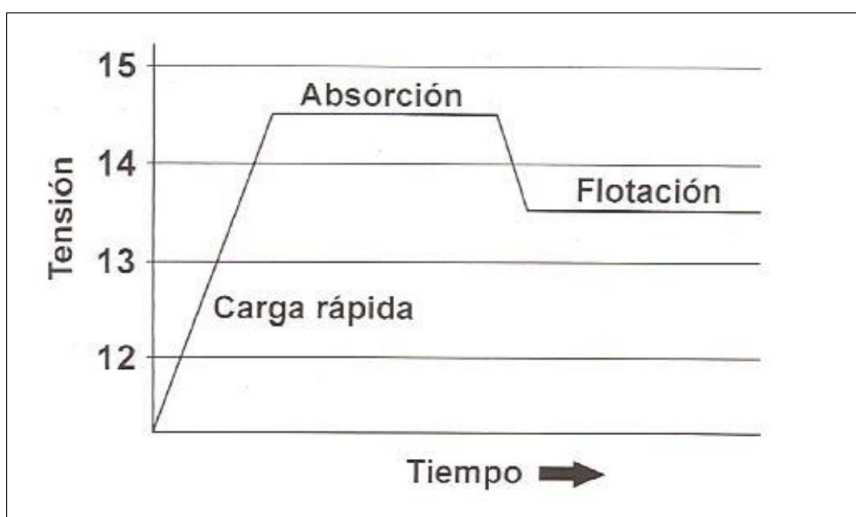
Nota. Tomado de la tesis *Sustentabilidad energética para casas habitación: Energía Solar* (p. 61) por Vera Alvarado, 2014, Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México.

2.2.8. Controlador de carga o regulador

Usualmente el acumulador es el elemento que presenta mayores inconvenientes en su durabilidad y confiabilidad, por lo que pone en riesgo el funcionamiento del sistema FV. Por esta razón existe el sistema de regulación, que evita que la batería esté sometida a condiciones indeseables como la sobrecarga, sobre descarga, temperaturas, etc. (las protecciones y funciones adicionales dependerá del modelo escogido, de tal manera que uno de última generación nos proporcionará mayor fiabilidad del sistema) (Vera Alvarado, 2014).

Figura 15

Ciclo de carga de un regulador de tres etapas



Nota. Tomado de la tesis *Sustentabilidad energética para casas habitación: Energía Solar* (p. 65) por Vera Alvarado, 2014, Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México.

2.2.9. Inversor

En la mayoría de los sistemas fotovoltaicos autónomos se conectan cargas diseñadas para que operen en la red eléctrica convencional, en nuestro contexto, de 220 VAC; por lo que la energía entregada debe tener las mismas características. El inversor o convertidor DC-AC nos ayuda precisamente en esto. Existe una amplia gama de inversores, los cuales se eligen dependiendo de la señal de entrada que le llega, y la señal de salida que necesitamos.

Figura 16

Inversor fotovoltaico 24 VDC/230VAC 50Hz, 500W



Nota. Tomado de la tesis *Ángulo de inclinación óptimo para incrementar la potencia eléctrica de generación del panel solar fotovoltaico de la Universidad Nacional del Centro del Perú* (p. 34) por Siuce, 2022, Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú.

2.2.10. Eficiencia de Conversión

Es la relación entre la energía solar captada por el panel, y la que se transforma en energía eléctrica utilizable. Es un indicador crítico del desempeño de un panel, influido por las características técnicas del sistema y las condiciones ambientales.

$$n_{conv} = \frac{\text{Energía eléctrica}}{\text{Energía solar captada}} \quad \dots (12)$$

2.2.11. Optimización de paneles solares

La optimización de paneles solares incluye todas las técnicas y estrategias utilizadas para mejorar su eficiencia y reducir las pérdidas de energía. Esto abarca desde el diseño del material y la estructura hasta la implementación de tecnologías avanzadas de control y monitoreo.

La optimización se logrará siempre y cuando, luego de la implementación de este, la eficiencia con respecto a un sistema simple sea mayor.

2.2.12. Sostenibilidad Energética

La sostenibilidad energética se refiere al uso eficiente y responsable de los recursos energéticos, garantizando su disponibilidad a largo plazo sin comprometer el medio ambiente ni las necesidades de futuras generaciones.

2.2.13. Condiciones climáticas de Piura

De acuerdo con los datos del Senamhi (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú), los meses con temperaturas más altas son: febrero y marzo (34.1°C), y las temperaturas más bajas en los meses de julio, agosto y setiembre (17.1°C). Las lluvias más intensas se dan en el mes de marzo (65.5 mm/mes).

Esta región está entre las zonas con más potencial de energía solar, entre 5.5 a 6.0 kWh/m^2 aproximadamente. Sin embargo, la variación estacional juega rol importante en la recepción de este recurso.

El promedio de la radiación solar en el año en las provincias del oeste y centro (Sechura, Talara, Paíta, Piura) es de 5.34 kWh/m^2 ; y en la provincia Huancabamba, que se ubica al oeste, es de 3.7 kWh/m^2 . En base a estas condiciones, se hace considerablemente viable la construcción de sistemas de paneles solares en la región Piura, especialmente en Huancabamba debido a sus bajas temperaturas respecto a las provincias costeras (Atarama Montero, 2019).

Figura 17

Mapa de Piura



Nota. Extraído de la página web del INEI.

inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1205/mapas/mapa22

Capítulo III. Desarrollo del Trabajo de Investigación

3.1. Zona de estudio

3.1.1. Datos geográficos

En el presente trabajo se analizará la ciudad de Piura. Es una provincia ubicada al noreste del Perú, y es la parte central de la Región de Piura, así como su capital.

Posee una extensión territorial aproximada de 621 km² y, según el censo del INEI realizado en el 2020, es la quinta ciudad más poblada del Perú.

La ciudad está a una altura de 29 m.s.n.m y posee in clima cálido, desértico, seco, tropical y oceánico, con temperaturas máximas de 34°C, los cuales se alcanzan en los meses de febrero y marzo; y con lluvias fuertes en el verano y parte del otoño.

Tabla 2

Datos de temperatura y precipitación de Piura

Mes	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Precipitación (mm)
Enero	33.3	21.9	42
Febrero	34.1	23.2	41
Marzo	34.1	22.8	66
Abril	32.5	21.4	53
Mayo	30.3	19.4	15
Junio	28.3	18	7
Julio	27.5	17.1	0
Agosto	27.9	17.1	0
Setiembre	28.8	17.1	0
Octubre	29.5	17.8	1
Noviembre	30.3	18.2	1
Diciembre	31.9	20	9

Promedio	30.7	19.5
-----------------	------	------

Nota. Los datos fueron obtenidos de la página web del SENAMHI, Pronóstico del Tiempo (<https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=piura&p=pronostico-detalle>)

Realizando un promedio, la temperatura anual sería 25.1°C.

Se tomará en cuenta las coordenadas (-5.1889 Latitud, -80.6610 Longitud) del Campo Sintético Deportivo “Santa Rosa” como referencia para la ciudad de Piura, ya que los valores de irradiancia en la capital no poseen desviaciones significativas.

3.1.2. Datos de irradiación solar

Existen numerosas fuentes de datos de la irradiación a nivel mundial, en donde estos son obtenidos con ayuda de satélites, sin embargo, la recolección de información no siempre se realiza de manera equitativa en todo el mundo, por lo que solo algunas fuentes son verdaderamente útiles para conseguir datos de la irradiación en el Perú dentro de los últimos años. Tal es el caso de la NSRDB (Base de Datos Nacional de Radiación Solar), la cual es una colección de datos meteorológicos recopilados y desarrollados por el NREL (Laboratorio Nacional de Energías Renovables), institución perteneciente al Departamento de Energía de los Estados Unidos. Dicha data está actualizada hasta el 2023 para la mayoría de los países de América, en donde Perú está incluido.

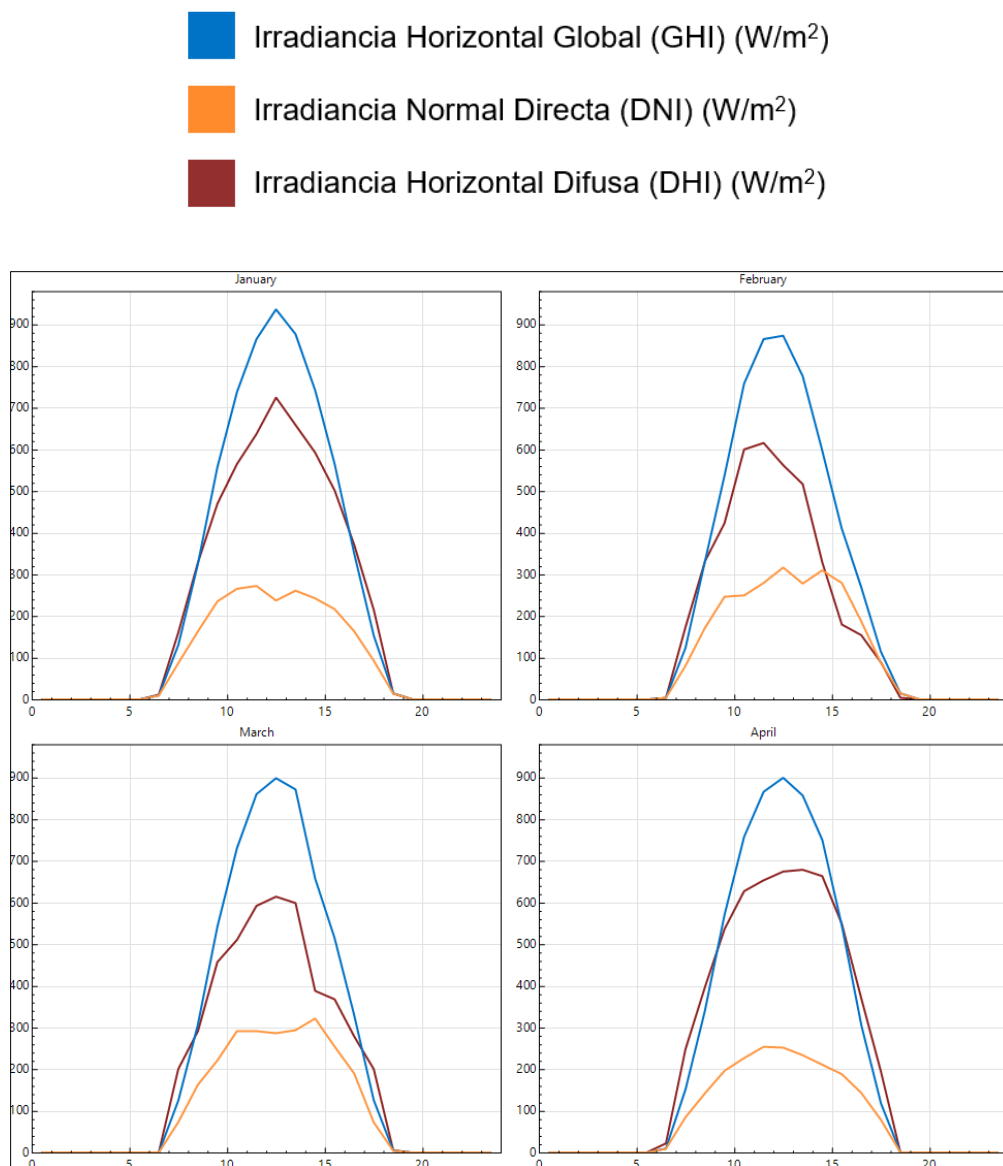
Para hacer uso de la base de datos NSRDB, se debe usar el software System Advisor Model (SAM) versión 2024.12.12, un programa diseñado por el NREL (National Renewable Energy Laboratory). De esta manera se pueden extraer los datos de irradiancia global y directa en un cielo a condiciones normales, y en un cielo despejado.

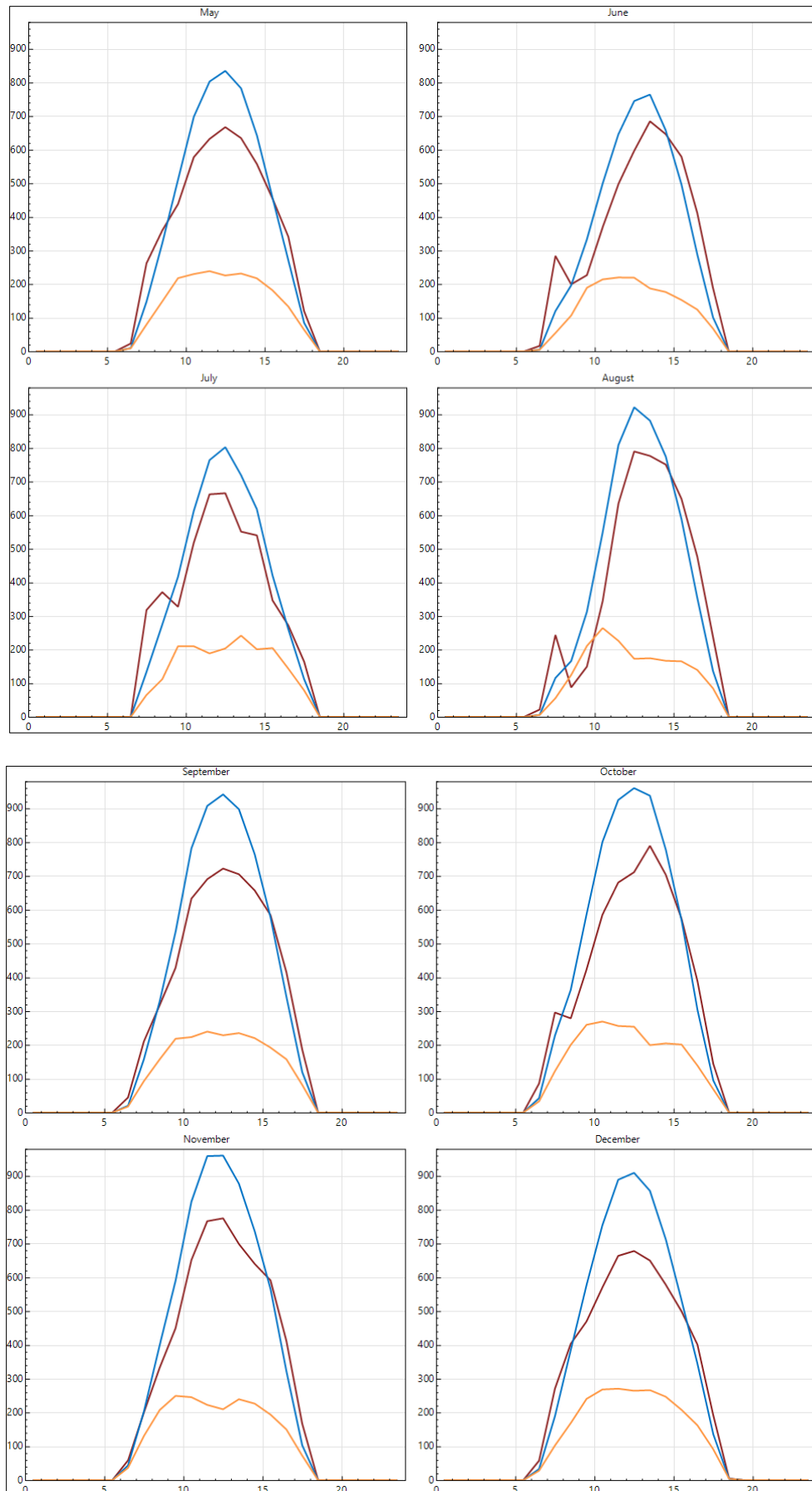
$$GHI = (DNI \cdot \cos\theta) + DHI \quad \dots (13)$$

En la fórmula (9) se representa la relación entre las diferentes irradiaciones calculadas en la data climatológica, en donde θ es el ángulo cénit, GHI es la radiación total que recibe una superficie horizontal, DNI es la radiación que incide directamente a un plano horizontal, y el DHI es la radiación que llega indirectamente, debido al reflejo de los rayos solares.

Figura 18

Gráfico del promedio mensual de la irradiancia durante el día





Nota. Los gráficos obtenidos del software SAM (System Advisor Model)

Tabla 3

Datos de irradiación mensual en la ubicación (-5.1889°, -50.661°)

Mes	Irradiación Directa Normal mensual (DNI) (kWh/m²)	Irradiación Difusa Horizontal mensual (DHI) (kWh/m²)	Irradiación Horizontal Global mensual (GHI) (kWh/m²)
Enero	162.766	70.145	194.175
Febrero	111.547	70.189	158.863
Marzo	139.657	76.37	184.973
Abril	168.464	60.615	185.215
Mayo	157.161	61.385	172.53
Junio	141.081	51.589	145.672
Julio	146.875	57.711	159.228
Agosto	160.102	55.589	174.147
Setiembre	167.882	62.007	191.236
Octubre	175.547	68.529	204.285
Noviembre	172.258	65.552	197.509
Diciembre	168.611	72.02	196.017

Nota. Los valores de radiación solar fueron obtenidos mediante el software System Advisor Model (propiedad del NREL), cuya base de datos es el NSRDB.

3.2. Descripción del sistema fotovoltaico

3.2.1. Tipos de módulos fotovoltaicos

La selección de los módulos fotovoltaicos suele ser una etapa simple, sin embargo, hay que estar al tanto de las alternativas para realizar mejores comparaciones, y así dar como respuesta la opción más conveniente y eficiente en el sistema.

A continuación, se analizará un cuadro comparativo que se exhibe en la literatura científica. Este nos muestra las eficiencias de cada módulo fabricado con diferentes materiales. Este análisis se realizó bajo condiciones climáticas bajo el estándar AM1.5,

con valores de 100 W/m² y 25°C el cual es una referencia para la irradiancia solar en la Tierra (Green et al., 2024).

Tabla 4

Tabla de eficiencias de celdas solares

	Clasificación	Eficiencia (%)	Área (cm ²)	Voc	Jsc	FF
Silicio	Silicio (cristalino)	27.3	243.1	0.7434	42.6	86.2
	Silicio (submódulo fino de transferencia)	21.2	239.7	0.687	38.5	80.3
	Silicio (película fina)	10.5	94	0.492	29.7	72.1
III - V	GaAs (película fina)	29.1	0.998	1.1272	29.78	86.7
	GaAs (policristalino)	18.4	4.011	0.994	23.2	79.7
	InP (cristalino)	24.2	1.008	0.939	31.15	82.6
Película fina	CIGS	23.35	1.043	0.734	39.58	80.4
	CdTe	21	1.0623	0.8759	30.25	79.4
Amorfo	Silicio amorfo	10.2	1.001	0.896	16.36	69.8
	Perovskita	25.2	1.0347	1.162	26.39	82
	Organico	15.8	1.064	0.8513	25.11	73.9
Multiunión	Perovskite/Si	34.2	1.0044	1.99	20.65	83.2
	InGaP/GaAs/InGaAs	37.9	1.047	3.065	14.27	86.7
	GaInP/GaInAsP//Si	36.1	3.987	3.309	12.7	86

Fuente. Green, M. A., Dunlop, E. D., Yoshita, M., Kopidakis, N., Bothe, K., Siefer, G., Hinken, D., Rauer, M., Hohl-Ebinger, J., & Hao, X. (2024). Solar cell efficiency tables (Version 64). Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 32(7), 425-441. <https://doi.org/10.1002/pip.3831>

En el cuadro se observa que usando células multiunión se alcanzan eficiencias superiores al 35%, e incluso en los laboratorios se alcanzaron porcentajes mayores al

40%, sin embargo, estos tipos de paneles aún no se pueden adaptar al mercado ni a un sistema convencional de paneles solares, por lo que no los tomaremos en cuenta.

En el caso de la perovskita (PSC), este es conocido por ser fácil de fabricar y tener un menor coste, sin embargo, no posee suficiente garantía y fiabilidad dentro de un proyecto fotovoltaico, además de que no existen aún técnicas para producir los paneles a escala industrial. A pesar de eso, es un material con gran potencial dadas sus ventajas.

Por lo que la opción más recomendable es el silicio cristalino, que se divide en 2 tipos: silicio monocristalino y policristalino, en donde este último posee una menor eficiencia. En consecuencia, se elegirá al panel monocristalino.

3.2.2. Datos de los paneles solares

Los componentes del sistema fotovoltaico están conformados por: paneles o celdas solares, baterías, inversor, controlador de carga y estructuras. Sin embargo, nos centraremos en especificar solamente los parámetros del componente con mayor relevancia, las células fotovoltaicas.

Se usará para el estudio dos paneles fotovoltaicos de 500w con células monocristalinas (por lo que tendríamos una potencia nominal de 1kW), con eficiencia de 21%, y un coeficiente de temperatura de potencia de $-0.35\%/^{\circ}\text{C}$. El área total estimada del módulo es de 4.762 m^2 .

$$Eficiencia = \frac{Potencia \text{ del panel } (W)}{\text{Área } (m^2) \cdot 1000 \frac{W}{m^2}} \cdot 100\% \quad \dots (14)$$

La eficiencia es obtenida en la ecuación (14) bajo condiciones estándar de operación o STC (Standard Operating Conditions), la cual posee los siguientes parámetros: 1000 W/m^2 de irradiancia solar, temperatura de la celda igual a 25°C , y

masa de aire de 1.5. Debido a esto, la eficiencia puede variar bajo condiciones climatológicas diferentes.

Existe el factor GCR (Ground Coverage Ratio) o también llamado “Índice de cobertura del terreno”. Se define como la relación entre el área del conjunto fotovoltaico y el área del suelo ocupada por el conjunto. En el caso de un conjunto configurado en filas de módulos, el GCR es la longitud del lado de una fila dividida por la distancia entre la parte inferior de una fila y la parte inferior de la fila vecina. Al aumentar el GCR, se reduce el espacio entre filas. El valor puede variar de 0 a 1

Para el caso de nuestro estudio, se eligió un factor de GCR de 0.3, siendo este el recomendado y estándar para nuestro tipo de arreglo (Stephens & Angel, 2012).

3.2.3. Pérdidas del sistema

En este apartado se define el conjunto de pérdidas y diversas categorías estipuladas en el software como relevantes. Entre las que están incluidas tenemos: suciedad, sombra, nieve (cero en este caso), disparidad, cableado, conexiones, degradación por luz, valor nominal, antigüedad (cero en este caso) y disponibilidad. Estos valores fueron extraídos de los documentos técnicos del software, provisto por el NREL¹⁶.

Las pérdidas de sombra representan el bloqueo de luz solar por parte de objetos en el horizonte, como edificios u otras construcciones. El valor promedio para lugares sin problemas de sombra es de 3%.

La degradación por luz es un fenómeno el cual consiste en la disminución de la potencia de salida de una celda cuando a este se le expone de luz solar por primera vez. Después de esto, la potencia se estabiliza e inicia una degradación a lo largo del

¹⁶ Dobos, A. (2014). PVWatts Version 5 Manual. 20 pp.; NREL Report No. TP-6A20-62641, <https://doi.org/10.2172/1158421>.

tiempo. De acuerdo con las mediciones de la literatura, se considera 1.5% como un valor estándar.

El valor de pérdidas por nieve es cero debido a su ausencia en nuestra ubicación. Asimismo, el valor de antigüedad es cero, ya que estamos considerando un equipamiento nuevo.

Existe información adicional de los parámetros típicos para los sistemas fotovoltaicos en el trabajo presentado por B. Marion¹⁷.

Tabla 5

Pérdidas del sistema

Categoría	Valor (%)
Suciedad	2
Sombra	3
Nieve	0
Disparidad	2
Cableado	2
Conexiones	0.5
Degradación por luz	1.5
Valor nominal	1
Antigüedad	0
Disponibilidad	3

Fuente. Dobos, A. (2014). PVWatts Version 5 Manual. 20 pp.; NREL Report No. TP-6A20-62641.

¹⁷ Marion, W.; Adelstein, J.; Boyle, K.; Hayden, H.; Hammond, B.; Fletcher, T.; Canada, B.; Narang, D.; Shugar, D.; Wenger, H.; Kimber, A.; Mitchell, L.; Rich, G.; Townsend, T. (2005). Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems. Proc. of 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference, January 2005, Lake Buena Vista, Florida.

Tomando en cuenta lo anterior, se procede a calcular las pérdidas totales, cuyo valor nos da 14.08%.

$$\begin{aligned} \text{Pérdidas} = 1 - [(1 - 0.02) \cdot (1 - 0.03) \cdot 1 \cdot (1 - 0.02) \cdot (1 - 0.02) \cdot (1 - 0.005) \\ \cdot (1 - 0.015) \cdot (1 - 0.01) \cdot 1 \cdot (1 - 0.03)] \end{aligned}$$

$$\text{Pérdidas} = 0.14076 \approx 14.08\%$$

3.2.4. Tipo de campo de instalación

Existen 2 alternativas para nuestra simulación, una instalación en un campo de bastidor abierto, es decir, montados en el suelo; y un sistema montado en un techo.

En la primera el aire fluye de mejor manera y se obtiene un enfriamiento óptimo. En la segunda el flujo de aire se ve comprometido, por lo que aumentaría la temperatura de operación a la vez que disminuye la eficiencia.

Por este motivo se eligió la opción de un sistema instalado en un campo abierto montado en el suelo.

3.2.5. Ángulo azimutal

En el hemisferio sur, el cálculo del azimut óptimo generalmente busca orientar los paneles hacia el norte; y en el hemisferio sur se busca orientar los paneles hacia el sur. En nuestro caso, en la región de Piura, resulta lo óptimo tomar un azimut de 0° hacia el norte.

3.2.6. Ángulo de inclinación del panel

Ya que queremos hacer una comparación justa entre sistemas fijos frente a otras optimizaciones, es necesario establecer un ángulo de inclinación que nos proporcione mayor energía captada.

Tomando en base las referencias obtenidas, el método más usado con gran diferencia es el de tomar el valor de la latitud como inclinación óptima del panel solar.

Sin embargo, la latitud del lugar es demasiado baja (-5.189), por lo que se recomienda tener como mínimo una inclinación de 15°. Además de que no es recomendable bajar tanto el ángulo de inclinación en lugares con mayores cantidades de polvo, lluvia, entre otras cosas. Por esta razón se tomará este valor mínimo para los cálculos de sistemas fijos.

3.2.7. Eficiencia del sistema

La eficiencia del sistema fotovoltaico se calcula según la ecuación (15):

$$n_e = \frac{P_{elec}}{G \cdot A} \quad \dots (15)$$

P_{elec} : Potencia eléctrica de salida (W)

G : Radiación solar (W/m²)

A : Área del panel (m²)

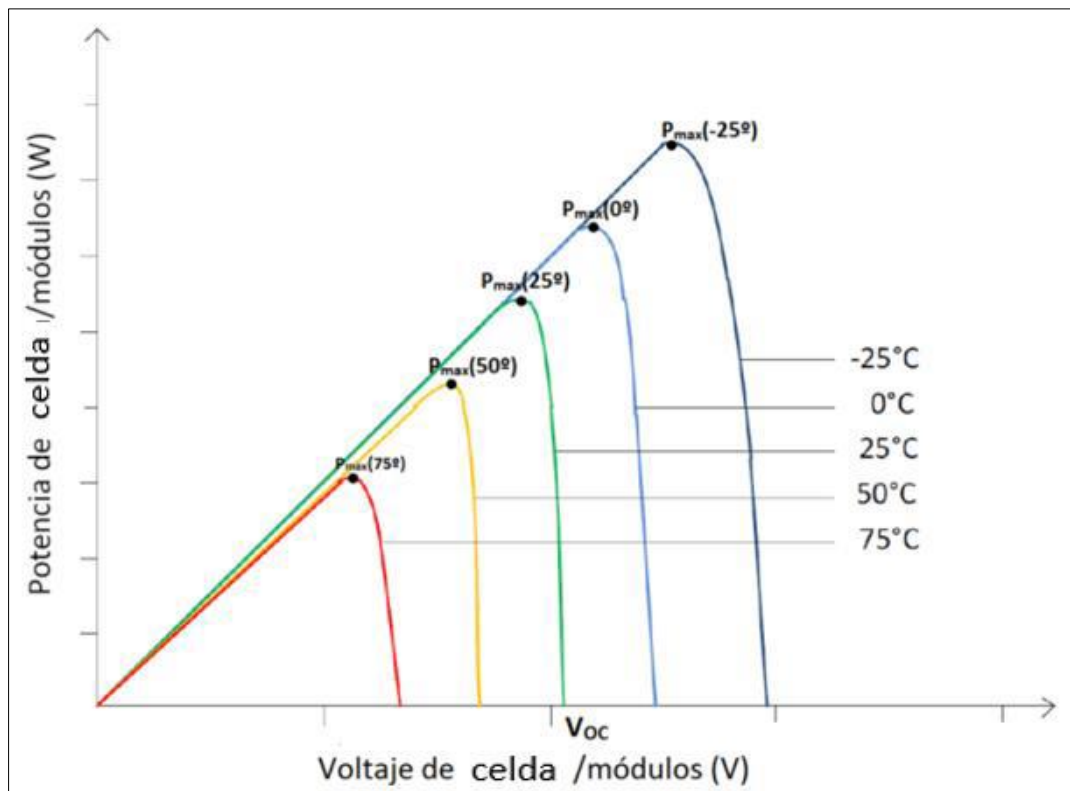
El valor G que se usa es la irradiancia que incide en el plano del panel o también llamado por las siglas en inglés POA (Plane of Array).

3.3. Efecto de la temperatura en los PV

Uno de los factores que más comprometen a los paneles solares, es la temperatura, ya que disminuyen el voltaje de los módulos (V_{oc}) a mayor ritmo de lo que la corriente de cortocircuito aumenta (I_{sc}), por lo que la potencia total disminuye (Linares Rojo, 2022).

Figura 19

Relación entre la temperatura y la potencia de los módulos



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

En lo que respecta a la variación de la eficiencia eléctrica, este está determinado por el coeficiente de temperatura (β_T) que cada celda posee. Tomando en cuenta nuestro panel, tenemos que el coeficiente es de $-0.35\%/^{\circ}\text{C}$ y con una eficiencia nominal de 21% a 25°C . Esto significa que por cada grado la eficiencia disminuirá en un 0.35%.

Con la anterior información se puede construir la función lineal (16) para expresar la variación de la eficiencia nominal en función de la temperatura.

$$n_c = n_{ref} [1 - \beta_T (T_c - T_{ref})] \quad \dots (16)$$

En donde:

n_c : Eficiencia de operación

n_{ref} : Eficiencia nominal de referencia (21%)

T_C : Temperatura de operación

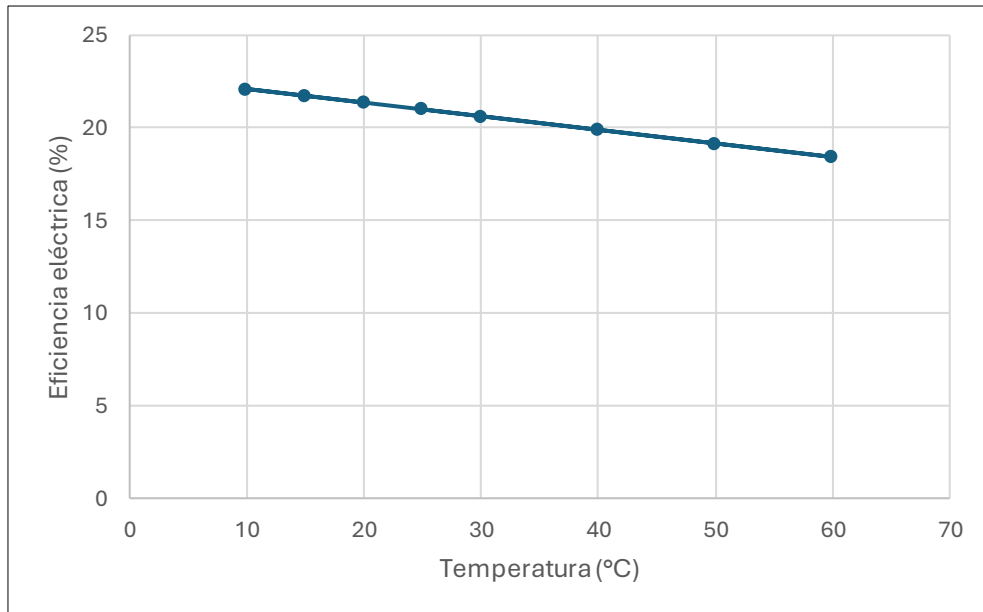
T_{ref} : Temperatura de referencia (25°C)

Reemplazando, obtenemos la expresión (13):

$$n_C = 21 \cdot [1 - 0.35\%(T_C - 25)] \quad \dots (17)$$

Figura 20

Función que relaciona la eficiencia eléctrica del panel para distintas temperaturas y bajo condiciones estándar de operación.



Nota. El gráfico fue de elaboración propia

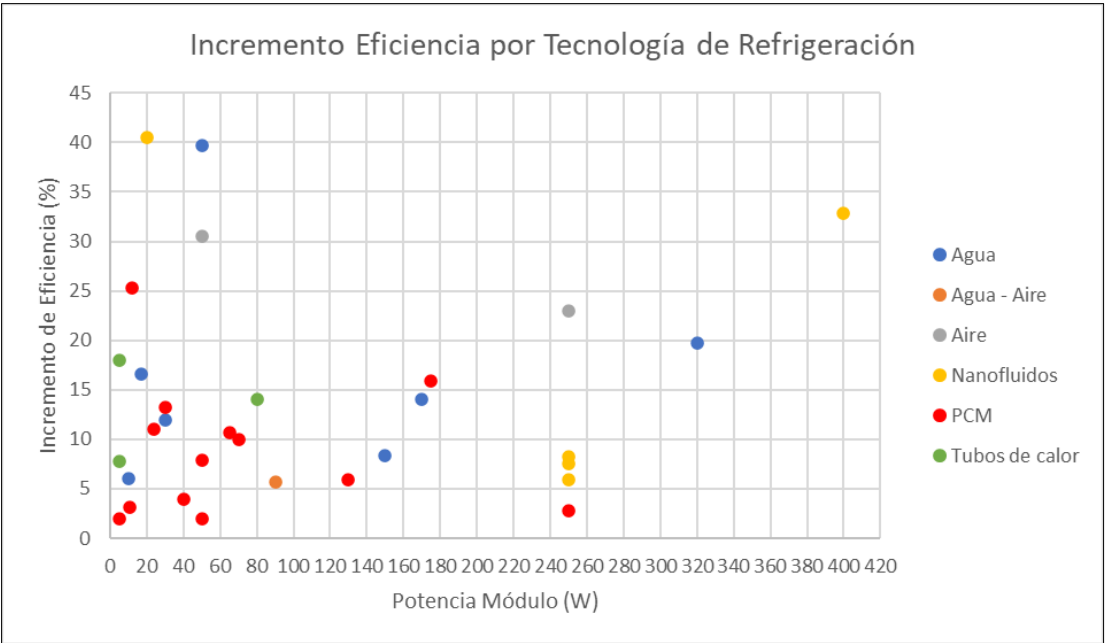
3.4. Refrigeración de las celdas solares

Existen diferentes mecanismos de refrigeración realizados en diferentes trabajos, en donde se usan diferentes fluidos de transferencia de calor y diferentes técnicas: aire, agua, aire-agua, nanofluidos, PCM y tubos de calor.

A continuación, se mostrará un gráfico recopilatorio de las tecnologías de refrigeración que muestra la potencia del módulo el cual se utilizó para las pruebas, y el incremento de la eficiencia.

Figura 21

Incremento de la eficiencia de las tecnologías de refrigeración



Nota. Extraído del trabajo de grado “Efecto de la temperatura en paneles solares fotovoltaicos y tecnologías de refrigeración para el mejoramiento de la eficiencia” (p. 65), por Linares (2022), Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia

Los resultados promedio que se obtuvieron en cuanto al incremento de la eficiencia están indicados en la tabla 6.

Tabla 6

Incremento de la eficiencia para cada tipo de refrigeración

Tecnología de refrigeración	Incremento de eficiencia promedio (%)
Agua-aire	21.85
Nanofluidos	21.1

Agua	17.72
Aire	16.45
Tubos de calor	14.63
PCM	8.92

Fuente. “Efecto de la temperatura en paneles solares fotovoltaicos y tecnologías de refrigeración para el mejoramiento de la eficiencia” (p. 65), por Linares (2022), Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia

Las tecnologías con el mejor desempeño son las que usan agua-aire, nanofluidos y agua. En cuanto a los nanofluidos, este es un sistema más costoso, por lo que la elección más idónea es aquella en la que se usa agua como fluido.

También existen 2 tipos de sistemas: activos y pasivos. Aunque los sistemas activos generan un consumo extra de energía, estos son los que mejores resultados dan. Además de que puede aprovecharse en un sistema híbrido PV-T.

3.5. Optimización por sistema de seguimiento solar

Los sistemas de seguimiento solar son muy bien recibidos en lugares cerca de la línea ecuatorial, como Piura; ya que existen menores variaciones estacionales.

En diversos trabajos y proyectos en los cuales se realizan esta mejora, se utilizan componentes similares a los ya explicados en el marco conceptual del presente trabajo (controladores, motores, etc.), por lo que poseen similares resultados. Entre los tipos que podemos emplear están los sistemas de un eje, y los sistemas de doble eje; en donde este último presenta un mejor desempeño.

Vale la pena aclarar que la implementación de un seguidor solar nos permite aumentar la irradiancia POA (Plane of Array), la cual es la cantidad de radiación captada por el panel solar, sin embargo, esto no incrementa la eficiencia del panel en sí, ya que

es un sistema externo a este. En lugar de eso se calcula el incremento de la captación solar.

Los datos de irradiancia POA y energía DC de salida para los paneles fijos y con seguidores solares fueron obtenidos mediante simulación en el software SAM ingresando los valores previamente mencionados, y posteriormente organizándolos en las tablas 7, 8 y 9.

En cuanto al consumo energético del seguidor solar, este por lo general no se toma tanto en cuenta en cálculos aproximados, sin embargo, para mayor exactitud se usarán los datos de referencia de otros seguidores solares. El consumo energético de un seguidor solar de un eje es alrededor de unos 15 Wh/día, y para el de dos ejes es de unos 20 Wh/día (Khoiyi & Shahhoseini, 2020).

Tabla 7

Datos de energía para paneles fijos a 15° de inclinación

Mes	Irradiancia mensual proyectada en el panel (kWh/m²)	Energía DC convertida mensual (kWh)
Enero	204.890	160.217
Febrero	160.760	124.299
Marzo	178.640	137.549
Abril	167.653	130.196
Mayo	149.198	116.828
Junio	122.340	96.624
Julio	136.066	107.592
Agosto	155.228	123.130
Setiembre	180.591	143.410
Octubre	204.404	161.698
Noviembre	206.872	164.241
Diciembre	209.769	164.784

Promedio	173.034	135.881
-----------------	---------	---------

Nota. Cuadro de elaboración propia

Tabla 8

Datos de energía para paneles con seguimiento en 1 eje

Mes	Irradiancia mensual proyectada en el panel (kWh/m²)	Energía DC convertida mensual (kWh)
Enero	230.750	181.168
Febrero	183.145	141.986
Marzo	218.332	168.450
Abril	227.901	178.226
Mayo	209.919	166.228
Junio	179.206	144.087
Julio	192.665	154.630
Agosto	210.639	168.976
Setiembre	232.928	186.003
Octubre	246.696	195.961
Noviembre	236.950	188.985
Diciembre	236.188	186.474
Promedio	217.110	171.765

Nota. Cuadro de elaboración propia

Tabla 9

Datos de energía para paneles con seguimiento en 2 ejes

Mes	Irradiancia mensual proyectada en el panel (kWh/m²)	Energía DC convertida mensual (kWh)
Enero	245.226	192.021
Febrero	189.020	146.445
Marzo	224.301	172.903

Abril	242.738	189.414
Mayo	233.333	184.087
Junio	205.974	165.069
Julio	217.260	173.864
Agosto	227.587	182.218
Setiembre	243.060	193.793
Octubre	257.300	204.398
Noviembre	251.974	200.782
Diciembre	256.031	201.525
Promedio	232.817	183.877

Nota. Cuadro de elaboración propia

Para estudiar el porcentaje de mejora se usará la ecuación (18), la cual se basa en la investigación realizada por Khoyi, A. K. & Shahhoseini, A¹⁸. Posteriormente se organizará los datos de salida en la tabla 10.

$$\text{Porcentaje de mejora} = \frac{E_S - C_S - E_{FIJO}}{E_{FIJO}} \cdot 100 \quad \dots (18)$$

Es: Energía DC obtenida por PV con sistema de seguimiento solar.

Cs: Consumo energético del sistema.

E_{FIJO}: Energía DC obtenida por PV con sistema fijo.

¹⁸ Khoyi, A. K., & Shahhoseini, A. (2020). The effect of consuming energy on the output power of a photovoltaic tracking system, case study: Urban area in Tehran. 2020 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICEE50131.2020.9260782>.

Tabla 10*Porcentaje de mejora de un seguidor solar*

Mes	Porcentaje de mejora (1 eje)	Porcentaje de mejora (2 ejes)
Enero	12.7864	19.4636
Febrero	13.8915	17.3662
Marzo	22.1274	25.2521
Abril	36.5449	45.0229
Mayo	41.8864	57.0403
Junio	48.6555	70.2153
Julio	43.2867	61.0194
Agosto	36.8562	47.4848
Setiembre	29.3864	34.7138
Octubre	20.9019	26.0238
Noviembre	14.7917	21.8831
Diciembre	12.8805	21.9202
Promedio	27.8329	37.2838

Nota. Cuadro de elaboración propia

3.6. Optimización por sistema híbrido

3.6.1. Características del sistema térmico

A continuación, se mostrarán los parámetros de entrada a considerar para la simulación del sistema térmico en el software SAM que se adecuen a nuestro sistema fotovoltaico previamente estipulado. Estos fueron elegidos de manera estándar considerando las recomendaciones del software y los anteriores experimentos con paneles híbridos PVT expuestos en la literatura.

Entre los datos de entrada, se tiene al factor $F_R U_L$ (o $FRUL$), el cual es la abreviatura del producto de dos valores: el F_R y U_L . En donde F_R es el factor de eficiencia

del colector, el cual toma en cuenta las pérdidas térmicas internas de este, y es adimensional; y el U_L es el coeficiente global de pérdidas térmicas del colector, con las unidades W/m^2-K . Juntos, el FRUL representa las pérdidas térmicas del colector solar.

- Temperatura exterior: 25.1°C (promedio anual de la ciudad de Piura)
- Eficiencia del intercambiador de calor: 75%
- Área del colector: 4.74 m²
- FRUL del colector: 2 W/m²-K
- Volumen del tanque: 200 L
- Flujo másico: 200 kg/día
- Relación entre la altura y el diámetro del tanque: 2
- Coeficiente de pérdida de calor del tanque: 0.5 W/m²-K
- Fluido de trabajo: Agua

El colector térmico se eligió en relación con las especificaciones con valores dentro de la media que se usarían en este tipo de lugares, además de tener un área similar al área del panel solar.

3.6.2. Cálculo de eficiencias

Como se explicó en el marco teórico, el sistema híbrido PVT estará representado como una unidad integrada por una parte eléctrica y una parte térmica, por lo que tendríamos dos eficiencias. Además, esta definición nos permite hallar la eficiencia total de todo el sistema de la siguiente manera:

$$n_{PVT} = n_e + n_T \quad \dots (19)$$

La suma de ambos valores equivale a decir que estamos analizando el sistema como una unidad integrada, cuya energía captada sería la irradiación solar en kWh/m² (el denominador), y la energía obtenida serían dos valores: la energía eléctrica de salida y el calor ganado por el agua.

La eficiencia eléctrica se calcula de la siguiente manera:

$$n'_e = \frac{E_{eléctrica}}{G \cdot A} \quad \dots (20)$$

Donde:

$E_{eléctrica}$: Energía eléctrica generada (kWh)

G : Irradiancia solar POA (Plane of Array) (kWh/m²)

A : Área del panel solar (m²)

Sin embargo, se debe considerar el factor de la refrigeración que incrementa este valor, ya que el sistema híbrido posee intrínsecamente un sistema de refrigeración basada en agua para el panel solar. Este cálculo se realizará según la ecuación (21).

Según la literatura obtenida en cuanto a métodos de refrigeración de paneles solares, se obtienen los siguientes valores porcentuales de incremento en la eficiencia: agua-aire 21,85%, nanofluidos 21,1%, agua 17,72%, aire 16,45%, tubos de calor 14,63% y PCM 8,92% (Linares Rojo, 2022).

En nuestro caso tomaremos en cuenta la refrigeración por agua.

$$n_e = n'_e \cdot (1 + n_r) \quad \dots (21)$$

n_r : Eficiencia por la refrigeración (0.1772 para el agua)

n'_e : Eficiencia eléctrica sin refrigeración

La eficiencia térmica está determinada por ecuación (22):

$$n_T = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{SALIDA} - T_{ENTRADA})}{G \cdot A} \quad \dots (22)$$

En donde:

$\dot{m}$: Caudal másico del fluido de transferencia de calor (agua) (kg/s)

c_p : Calor específico del fluido (J/kg.K)

Los datos necesarios para el cálculo de la eficiencia térmica se obtuvieron de la simulación por software, usando como datos de entrada los parámetros mencionados anteriormente. Estos se pueden observar en la tabla 11.

Tabla 11

Temperatura de salida y calor entregado mensualmente

Mes	Temperatura de salida (°C)	Calor mensual entregado (kWh)
Enero	70.224	272.677
Febrero	68.515	237.217
Marzo	68.636	268.761
Abril	69.111	268.627
Mayo	64.996	254.664
Junio	58.724	209.582
Julio	60.813	233.977
Agosto	64.075	254.838
Setiembre	66.761	259.424
Octubre	68.323	271.529
Noviembre	68.217	256.180
Diciembre	70.400	276.088
Promedio	66.566	255.297

Nota. Cuadro de elaboración propia

Obteniendo este valor, en conjunto con la eficiencia eléctrica, se obtiene la eficiencia total del sistema.

Como resultado se obtiene la tabla 12 que muestra la eficiencia total en cada mes, y el promedio anual.

Tabla 12*Parámetros térmicos y eficiencias del sistema híbrido*

Mes	Radiación absorbida (kWh)	Calor entregado (kWh)	Energía DC de salida (kWh)	Eficiencia térmica (%)	Eficiencia eléctrica (%)	Eficiencia total (%)
Ene	971.179	272.677	160.217	28.077	19.420	47.497
Feb	762.002	237.217	124.299	31.131	19.203	50.333
Mar	846.754	268.761	137.549	31.740	19.123	50.863
Abr	794.675	268.627	130.196	33.803	19.287	53.090
May	707.199	254.664	116.828	36.010	19.447	55.457
Jun	579.892	209.582	96.624	36.142	19.615	55.757
Jul	644.953	233.977	107.592	36.278	19.638	55.916
Ago	735.781	254.838	123.130	34.635	19.700	54.335
Set	856.001	259.424	143.410	30.306	19.722	50.029
Oct	968.875	271.529	161.698	28.025	19.647	47.672
Nov	980.573	256.180	164.241	26.126	19.717	45.843
Dic	994.305	276.088	164.784	27.767	19.509	47.276
Prom	820.182	255.297	135.881	31.670	19.502	51.172

Nota. Cuadro de elaboración propia**3.7. Optimización por sistema híbrido con seguidor solar**

El análisis que se realizará combinará ambas optimizaciones previamente explicadas y calculadas, además, se usarán los mismos elementos en la simulación, por lo que las eficiencias por separado y en conjunto serán las mismas.

Por otro lado, estas optimizaciones no poseen los mismos objetivos de mejora: los seguidores solares incrementan la irradiancia POA (Plane of Array), mientras que un sistema híbrido mejora la eficiencia de conversión. Por este motivo no se analizarán los porcentajes de eficiencia, sino la mejora en general y la energía aprovechada.

Tabla 13*Irradiación POA (Plane of Array) en sistemas fijos y con seguidores*

Irradiación POA (Plane of Array) (kWh)			
Mes	Sistema fijo	Seguidor de un eje	Seguidor de dos ejes
Enero	971.179	1093.755	1162.371
Febrero	762.002	868.107	895.955
Marzo	846.754	1034.894	1063.187
Abril	794.675	1080.251	1150.578
Mayo	707.199	995.016	1105.998
Junio	579.892	849.436	976.317
Julio	644.953	913.232	1029.812
Agosto	735.781	998.429	1078.762
Setiembre	856.001	1104.079	1152.104
Octubre	968.875	1169.339	1219.602
Noviembre	980.573	1123.143	1194.357
Diciembre	994.305	1119.531	1213.587
Promedio	820.182	1029.101	1103.553

Nota. Cuadro de elaboración propia

Ahora a continuación, y con todos los datos anteriores que se calcularon, se obtuvo la tabla 14, que resume la mejora que se obtendría con la aplicación de ambas optimizaciones.

En el caso del sistema híbrido se tiene 2 tipos de energía que se aprovechan, la eléctrica y la térmica, tal como se expresa en la ecuación (23):

$$\text{Energía aprovechada} = E_{elec} + Q_{term} \quad \dots (23)$$

Tabla 14

Energía aprovechada en cada tipo de sistema híbrido

	Energía obtenida (kWh)	Energía aprovechada (kWh)	
	Irradiación POA (Plane of Array)	Sistema simple PV	Sistema híbrido PV-T
Sistema fijo a 15°	820.182	135.881	419.707
Seguidor solar de un eje	1029.101	171.765	526.616
Seguidor solar de dos ejes	1103.553	183.877	564.715

Nota. Cuadro de elaboración propia

Ahora se calculará el porcentaje de mejora entre un sistema simple y un sistema híbrido con seguidor solar. Se realizará este procedimiento para un seguidor de un eje y uno de dos ejes.

Sistema híbrido con seguimiento de un eje:

$$\text{Incremento de energía aprovechada} = \frac{526.616 - 135.881}{135.881} \cdot 100\% = 287.557\%$$

Sistema híbrido con seguimiento de dos ejes:

$$\text{Incremento de energía aprovechada} = \frac{564.715 - 135.881}{135.881} \cdot 100\% = 315.595\%$$

Capítulo IV. Resultados, Contrastación de Hipótesis y Discusión

4.1. Análisis de las limitaciones del software

Para obtener todos los datos de salida relacionados a las optimizaciones que se estudiaron se usó el software System Advisor Model (SAM), un programa provisto por el National Renewable Energy Laboratory (NREL) para realizar simulaciones

Esta es una herramienta ampliamente utilizada para realizar modelos y análisis de carácter económico o energético para sistemas de energía renovable. Sin embargo, su uso presenta ciertas limitaciones y errores potenciales en las simulaciones que deben ser considerados para una correcta interpretación de los resultados.

- SAM emplea modelos matemáticos simplificados para predecir el desempeño de sistemas energéticos, lo que puede no capturar completamente la complejidad de ciertos fenómenos físicos y operacionales. Por ejemplo, en sistemas fotovoltaicos, la influencia de la suciedad en los paneles o el envejecimiento de los materiales no siempre está bien representada.
- Aunque SAM permite el análisis de sistemas híbridos, las interacciones complejas entre diferentes fuentes de energía pueden no estar completamente consideradas. Además de que algunos aspectos de control, despacho de energía o pérdidas externas no están suficientemente detallados.
- Según la descripción de SAM, este utiliza métodos de interpolación y aproximaciones numéricas que pueden introducir pequeños errores acumulativos.

Habiendo visto las limitaciones del software, se recomienda validar los resultados con datos reales y considerar la incertidumbre inherente a los modelos matemáticos

utilizados. Además, la combinación de SAM con otros enfoques de modelado puede mejorar la precisión en la evaluación del desempeño de los sistemas fotovoltaicos.

4.2. Análisis de los resultados de la optimización con seguidor solar

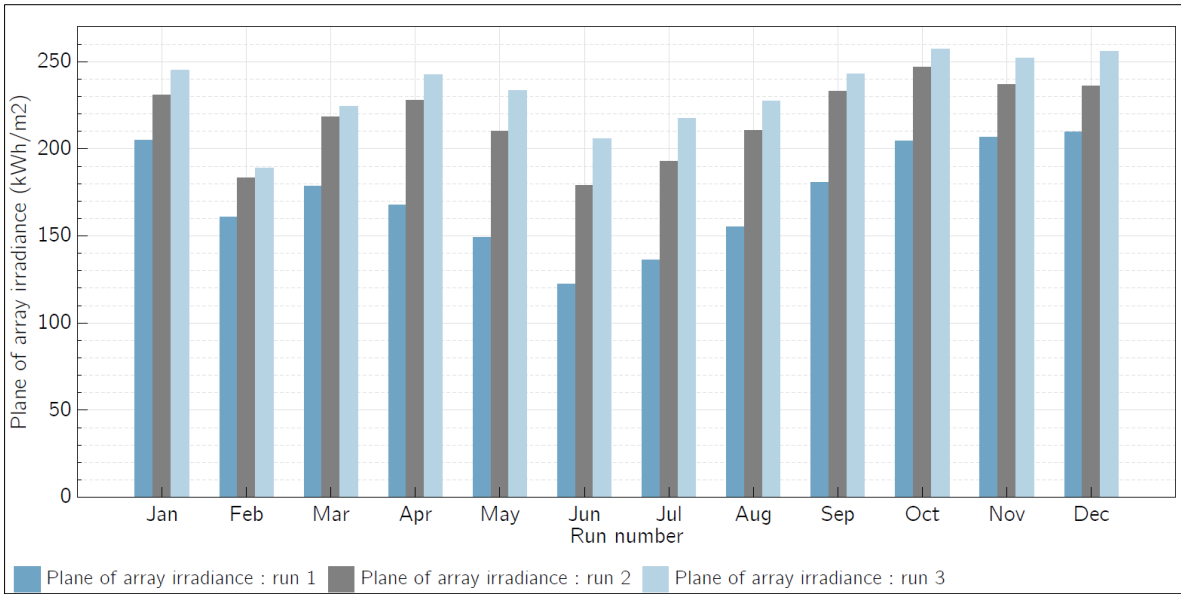
4.2.1. Radiación incidente

Los cálculos anteriormente hechos sobre la mejora de los seguidores solares se realizaron para cada mes del año, esto para poder analizar su efectividad en diferentes estaciones del año y a distintos niveles de temperatura y radiación.

Debido a la naturaleza del seguidor solar, en la que solo afecta la radiación captada por el panel (y en menor medida al consumo DC del sistema), los cálculos y resultados estarán enfocados en los parámetros radiación incidente POA y energía DC de salida.

Figura 22

Radiación incidente POA mensual con diferentes sistemas



Nota. El gráfico fue extraído de la simulación

En donde:

Run1: Panel fijo con 15° de inclinación

Run2: Panel con seguidor solar de un eje

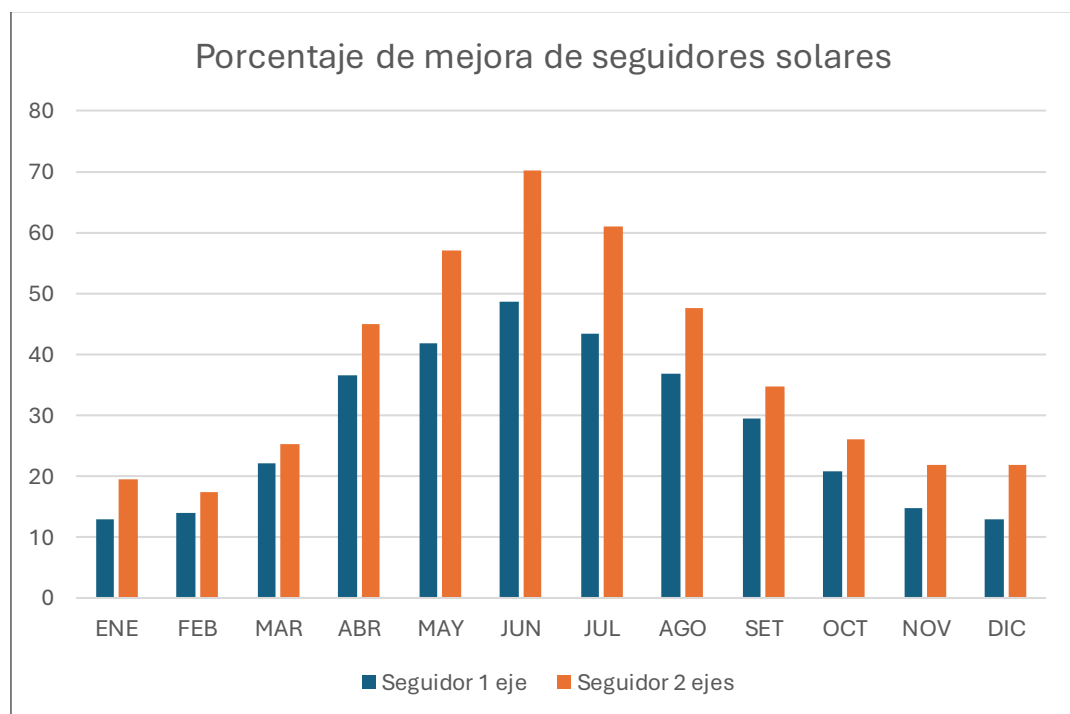
Run3: Panel con seguidor solar de dos ejes

En el anterior gráfico 22 puede observarse las grandes diferencias entre los valores medidos durante el verano y el invierno, en donde en un sistema fijo, esta diferencia es aún mayor.

También se puede notar que existe una gran mejora de energía en general entre un sistema fijo y un sistema con seguidor solar, pero una pequeña mejora entre un seguidor de un eje y uno de dos ejes.

Figura 23

Porcentaje de mejora de seguidores solares cada mes



Nota. Gráfico de elaboración propia

En la figura 23 se observa que existe mayor porcentaje de mejora en la captación solar durante el invierno, es decir, cuando el Sol sigue la trayectoria más baja. En esta estación la radiación solar no es tan elevada en comparación con el verano, por lo que se busca aumentar la cantidad de rayos solares que incidan directamente en el panel solar, la irradiación DNI.

Ahora a continuación, se calculará la desviación estándar para poder comparar la variación mensual de los valores de energía solar captada (irradiación POA) de los 3 diferentes sistemas.

Tabla 15

Promedio mensual y desviación estándar de la irradiancia POA en los 3 sistemas

	Panel fijo con 15° de inclinación	Panel con seguidor de 1 eje	Panel con seguidor de 2 eje
Promedio (kWh/m²)	173.034	217.110	232.817
Desviación estándar	28.260	21.348	20.090

Nota. Cuadro de elaboración propia

Como se observa en la tabla 15, los paneles con seguidores solares proporcionan menores variaciones entre los valores de energía obtenida, lo que nos generaría una mejor fiabilidad del sistema en cuanto a bajones de energía debido a los cambios de estación.

En cuanto a la mejora promedio anual calculada, el seguidor solar de un eje aumenta la captación en un 27.833% y el de dos ejes un 37.284%.

4.2.2. Discusión de la implementación

A nivel práctico esta mejora proporciona un mayor aprovechamiento del panel, y esto se traduce en un mayor beneficio energético tanto para los proyectos solares de gran magnitud en la ciudad de Piura, como para una instalación domiciliaria. Además de que su implementación no modifica el funcionamiento del panel, ya que se trata de un elemento externo. Dicho esto, esta optimización resulta ser una de las mejores opciones para usarse en cualquier ámbito.

Como punto a agregar, si bien un sistema de seguimiento de dos ejes puede ser más efectivo que uno de un eje, debido a las condiciones climáticas y de ubicación de Piura, resulta igual de válido considerar la instalación de un seguidor de un solo eje,

debido a temas económicos o de disponibilidad de producto, ya que existe mayor diferencia entre un sistema fijo y un seguimiento en un eje, que entre un seguidor de un eje y uno de dos ejes.

4.2.3. *Análisis del impacto ambiental*

Entre los impactos ambientales positivos tenemos:

- Aumento de la captación de energía solar: Los seguidores solares permiten un mejor aprovechamiento de la radiación al orientar los paneles hacia el sol, aumentando la producción energética y reduciendo el uso de combustibles fósiles para generarla.
- Se optimiza el uso del suelo, ya que, al generar más energía por panel, se puede reducir la cantidad de superficie necesaria para la misma producción.

Entre los impactos negativos tenemos:

- Mayor consumo de materiales comprometedores para el planeta: los mecanismos de seguimiento requieren motores, sensores y estructuras móviles, lo que aumenta el uso de materiales como metales y plásticos.
- Mayor mantenimiento y consumo de energía: El movimiento constante implica un mayor desgaste mecánico, mayor mantenimiento y un ligero consumo de energía para operar los sistemas de seguimiento (aunque este último es menos relevante).

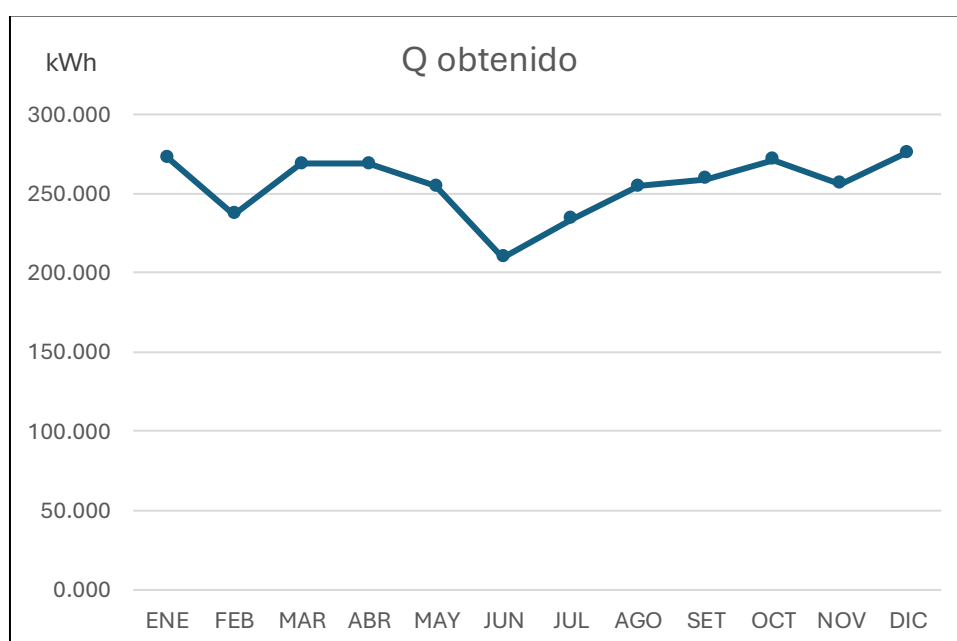
4.3. Análisis de los resultados del sistema híbrido PVT

4.3.1. Parámetros térmicos

Los cálculos sobre el sistema híbrido PVT están enfocados en el calor ganado de la radiación solar incidente y los parámetros relacionados a este, en donde no solo se aprovecha la energía eléctrica, sino también el aumento de temperatura generado.

Figura 24

Calor mensual obtenido por el sistema PVT



Nota. Gráfico de elaboración propia

Tabla 16

Promedio mensual y desviación estándar del calor entregado en un sistema híbrido

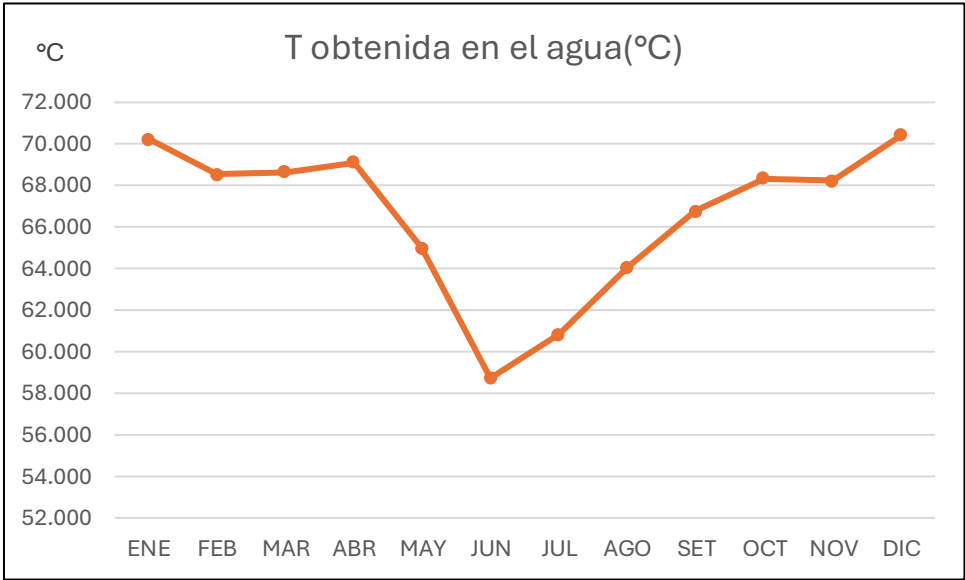
Promedio (kWh)	Desviación estándar
255.297	19.648

En el gráfico 24 se observa que el calor obtenido posee variaciones no muy altas, en donde su punto más bajo se produce en invierno, en el mes de junio con 209.582

kWh, y en los meses de enero y diciembre se dan los puntos más altos con 272.677 kWh y 276.088 kWh respectivamente.

Figura 25

Temperatura obtenida en el agua entregada por el sistema PVT



Nota. Gráfico de elaboración propia

Tabla 17

Promedio mensual y desviación estándar de la temperatura del agua caliente en un sistema híbrido

Promedio	Desviación estándar
66.566	3.714

Ahora, en el gráfico de la figura 25 de temperatura obtenida, se observa una tendencia similar a la del calor entregado, sin embargo, a diferencia de este, existe una mayor diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas. En donde el mínimo se produce en junio con 58.7°C y el máximo en diciembre y enero con 70.4°C y 70.2°C respectivamente.

El flujo másico de agua también juega un rol importante en la temperatura, ya que, si bien el incremento del flujo nos permitiría una mayor extracción del calor y un sistema más eficiente, la temperatura se reduciría. Este balance se hace de acuerdo con las necesidades. En nuestro caso el flujo es un valor medio-bajo, un incremento de este podría aumentar ligeramente la eficiencia, sin embargo, se decidió proseguir, ya que se decidió que la temperatura ya es la adecuada para el uso doméstico u otras aplicaciones.

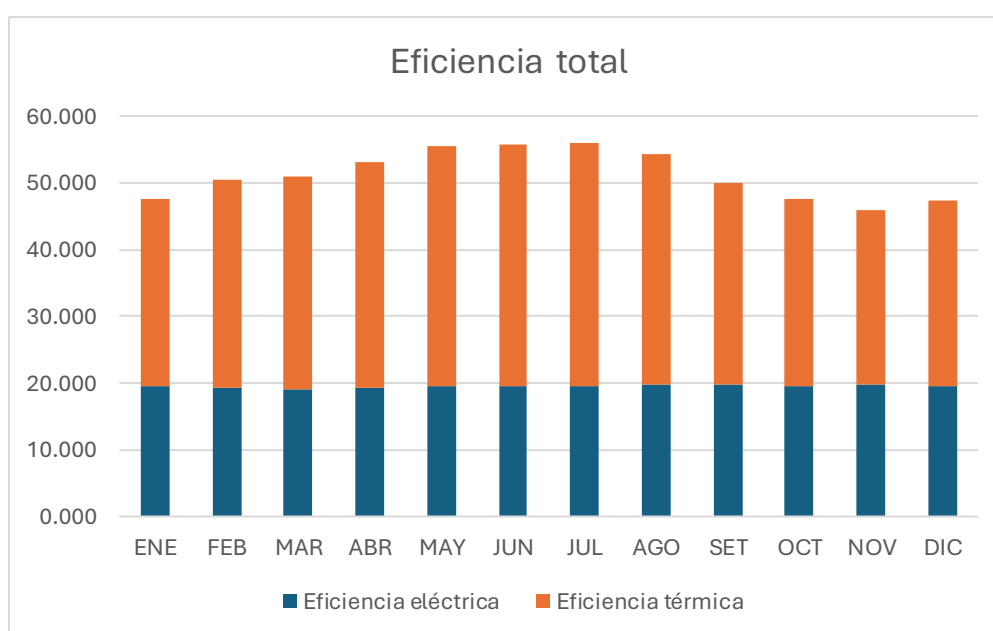
A pesar de esto, sigue siendo un valor aceptable, y el agua caliente se puede aprovechar de igual manera en sistemas sanitarios que lo mezclen con agua fría.

4.3.2. Eficiencia energética

En el análisis de eficiencia de la figura 26 se optó por usar un gráfico de barra doble, ya que este representa muy bien la eficiencia total de todo el sistema fotovoltaico-térmico (PVT), el cual es la suma de dos parámetros: eficiencia térmica y eficiencia eléctrica. Dicha expresión queda expuesta y comprobada en el marco teórico.

Figura 26

Gráfico de la eficiencia total mensual de un sistema híbrido



Nota. Gráfico de elaboración propia

Tabla 18

Promedio mensual y desviación estándar de las eficiencias en un sistema híbrido

	Promedio (%)	Desviación estándar
Eficiencia eléctrica	19.502	0.2080
Eficiencia térmica	31.670	3.6648
Eficiencia total	51.172	3.6558

Nota. Cuadro de elaboración propia

La eficiencia eléctrica promedio es 19.502%, y este valor casi no varía a lo largo del año, ya que este depende exclusivamente del funcionamiento del panel solar. El único parámetro externo que puede variar su porcentaje de eficiencia sería la temperatura, sin embargo, las diferencias siguen sin ser notables (además de que, en un sistema híbrido, los paneles solares poseen una refrigeración líquida constante).

En cuanto a la eficiencia térmica, esta si posee pequeñas variaciones, con una desviación de 3.66. Su valor promedio es de 31.67%, siendo un indicador de un mayor aprovechamiento de la transferencia de calor por radiación en comparación del efecto fotovoltaico, el cual tiene menor eficiencia.

La eficiencia térmica resulta ser mayor en invierno, al mismo tiempo que es la temporada con menor calor entregado y menor temperatura del agua.

Como fue explicado anteriormente, la eficiencia eléctrica apenas varía, por lo que la eficiencia total depende más del valor de la eficiencia térmica, por ende, ambos comparten las mismas tendencias. El valor promedio de la eficiencia total es de 51.172%, esto quiere decir que con un sistema híbrido se aprovecha más de la mitad de la energía solar (en comparación al 19.502% anterior), además de que equivale a un incremento de eficiencia promedio de un 162.39%.

Y en cuanto a la comparación con un sistema simple, la energía aprovechable es incrementada un 208.878%.

Se estima además de que este porcentaje podría ser aún mayor con captadores más especializados para el sistema, o también con un aumento del flujo másico, aunque esto significaría una reducción en la temperatura del agua caliente (como ya se explicó anteriormente).

4.3.3. *Discusión sobre la implementación*

A pesar del nivel elevado de eficiencia que podría traer un sistema híbrido PVT, su implementación es más costosa que un seguidor solar, así que se necesitarían análisis económicos para estudiar su viabilidad en un proyecto solar, además de la demanda de agua caliente en la ciudad de Piura.

Como segundo problema, un sistema híbrido PVT necesita una correcta gestión del calor extraído mediante sensores, por lo que se tendría un sistema mucho más complejo que el estudiado en el presente trabajo (dadas las aproximaciones que se dieron). Además, de que requiere un sistema de tuberías, un tanque de almacenamiento, válvulas, entre otros elementos relacionados a una instalación sanitaria.

Sin embargo, suelen ser mucho más viables en edificios con alta demanda de agua caliente, esto porque el flujo másico de agua será mayor, y por ende la eficiencia térmica será más alta, tal como se demostró anteriormente.

En general, un sistema híbrido necesita una mayor cantidad de elementos para que se pueda aprovechar en comparación con los seguidores solares, aunque nos permita aprovechar de mejor manera la energía solar.

4.3.4. Análisis de impacto ambiental

Entre los impactos ambientales positivos tenemos:

- Nos permite un mayor aprovechamiento del calor residual generado por la radiación solar, lo que equivale un menor desperdicio de energía.
- Reduce el uso de calentadores convencionales, como los que usan gas natural o electricidad. Esto significaría una reducción en el uso de estos.
- Menos emisiones de CO₂. Debido a que se optimiza el rendimiento de los paneles, hace más factible el uso de este tipo de energía renovable, a comparación de las energías que usan combustibles fósiles.

Entre los impactos negativos tenemos:

- Mayor complejidad de fabricación y reciclaje de materiales, ya que el sistema requiere en su mayor parte componentes compuestos (como el sistema de refrigeración), lo que dificulta el reciclaje de estos.
- Uso de agua para hacer viable la optimización. En climas secos y áridos como el de Piura, el agua puede ser un recurso crítico, por lo que la implementación de un sistema híbrido no siempre es conveniente.

4.4. Análisis de la implementación de un sistema híbrido con seguidor solar

Las mejoras de este método incluyen: aprovechamiento de la energía térmica, incremento de la energía captada y refrigeración líquida.

Usando los cálculos anteriores y todos los datos disponibles se da como resultado que el aumento de energía aprovechable desde un sistema simple fijo hasta un sistema híbrido con seguidor es de: 287.557% para un seguidor de un eje y 315.595%

para un seguidor de dos ejes, es decir, la implementación de ambas optimizaciones te permite aprovechar hasta más de 4 veces la energía.

A pesar de los resultados que alegan una mejoría muy elevada, hay que considerar sus implementaciones a niveles prácticos en proyectos solares. En este apartado existe un problema respecto a buscar las herramientas necesarias para construir ambas optimizaciones en un solo panel sin que exista una unión destructiva entre ellas, en donde el mayor ejemplo sería sobre la estructura personalizada que deberá diseñarse, ya que las dos tecnologías poseen un peso considerable.

Añadido a esto, se incluyen las desventajas que se mencionaron previamente en los resultados del sistema híbrido PVT.

Incluso considerando estas desventajas, el porcentaje de eficiencia de este tipo de optimización conjunta es muy a tomar en cuenta, y puede traer grandes beneficios a la sostenibilidad energética.

4.5. Análisis económico

A pesar de que el presente trabajo es acerca de un análisis meramente energético, se realizará una aproximación en cuanto a los costos de las mejoras expuestas en el presente trabajo y un análisis sobre el impacto económico de la implementación de estas optimizaciones, sin embargo, los valores monetarios que se usarán son meras estimaciones que pueden variar con el tiempo.

4.5.1. Seguidor solar

Se usará la página web de la empresa Autosolar para poder dar un presupuesto al sistema solar simple que se está estudiando. Este sistema se vende como un kit, y posee un costo de S/. 8000 aproximadamente, en el cual se incluye: un panel solar de silicio monocristalino (570 W), batería, inversor, conectores, terminales, cables y otros materiales eléctricos.

Ahora se calculará el costo aproximado de un sistema de seguimiento solar hecho con Arduino. Esto se realizó usando los precios de tiendas virtuales.

Tabla 19

Componentes de los seguidores solares

Componentes	Seguidor de un eje		Seguidor de dos ejes	
	Cantidad	Precio (S/.)	Cantidad	Precio (S/.)
Servomotor	1	700	2	1400
Placa Arduino Uno	1	100	1	100
Sensores de luz	2	20	2	20
Estructura	1	200	1	200
Componentes adicionales (cables, componentes electrónicos, protoboard, etc.)	1	50	1	50
TOTAL		1070		1770

De acuerdo con los datos se puede observar que se necesita invertir un 13.375% más para obtener un sistema con seguimiento solar en un eje, y un 22.125% para uno de dos ejes.

A pesar de que un sistema de seguimiento de doble eje ofrece una mayor generación de energía, estos no siempre pueden ser siempre rentables debido a su mayor inversión y costos operativos. Debido a esto, un seguidor de un solo eje suele ser la opción más segura, ya que ofrece la mejor relación costo-beneficio en ciertas condiciones.

4.5.2. Sistema híbrido PVT

Este sistema posee un precio más elevado, ya que requiere la implementación de una instalación sanitaria completa. Para la aproximación del costo se usará la investigación de (Perez Carretero, 2018), en donde se usan los elementos necesarios

para el sistema híbrido. Para poder vincular el valor monetario del presente trabajo, junto con el de la literatura, en la cual se apoya este análisis, se realizarán aproximaciones en cuanto a los valores de ambos trabajos. Por lo tanto, se estima un precio de unos 3700 euros lo que equivaldría a 14260.17 soles. Si los comparamos con el precio de un sistema común, equivaldría a un aumento de 78.252% en el precio. Este valor puede variar dependiendo del tamaño del proyecto, demanda energética, etc.

El sistema híbrido PVT nos proporciona un mayor aprovechamiento energético, además de cubrir la demanda eléctrica y de calor, sin embargo, debido a su elevado costo inicial suelen tener un periodo de retorno de inversión más largo en comparación con los sistemas fotovoltaicos convencionales.

4.5.3. Comparación entre optimizaciones

Tanto los seguidores solares como los sistemas híbridos PVT ofrecen ventajas en la optimización del aprovechamiento de la energía solar, pero su viabilidad económica depende de múltiples factores, como los costos de instalación, incentivos o bonos gubernamentales, análisis de la demanda energética específica, etc.

- En términos de rentabilidad a corto plazo, los seguidores solares son una opción más accesible, mientras que los sistemas PVT pueden ofrecer una mayor eficiencia a largo plazo si se requiere tanto electricidad como calor.
- En términos de alcance en la implementación de estas mejoras en proyectos solares, y que además sean rentables, los seguidores solares también son la opción con más alcances, ya que necesitan menos condiciones específicas para que puedan ser viables económicamente hablando. Por el contrario, un sistema híbrido necesita una demanda de agua caliente y un tiempo de espera mayor para el retorno de la inversión.
- La implementación de un sistema híbrido requiere condiciones específicas para que sea rentable, pero cuando estas se dan y se espera

el tiempo suficiente, generan mayores ganancias a largo plazo que un sistema de seguimiento solar.

4.6. Discusión sobre las limitaciones de las tecnologías actuales

Como se vio anteriormente en el capítulo 3, en la sección de tipos de celdas solares, los mejores paneles para un proyecto solar son los de silicio monocristalino, con una eficiencia de 27.3%, sin embargo, esta no es la tecnología actual más eficiente, sino que serían los materiales de multiunión InGaP/GaAs/InGaAs o de Perovskita y Silicio. El lado negativo sería su baja disponibilidad y escasa capacidad de poder comercializarse a gran escala.

Esto nos deja con la conclusión de que actualmente solo podemos obtener con un sistema simple un máximo de eficiencia que no supera el 30%. Debido a esto es que se trata de encontrar maneras para superar este valor con medidas alternativas, y así aprovechar mejor la energía solar captada.

Siguiendo con las tecnologías de los tipos de paneles, una gran parte de la radiación solar absorbida por las celdas que actualmente se usan se convierte en calor, lo que no solo reduce la eficiencia eléctrica, sino también puede acelerar la degradación del material.

Una solución a esto es la integración de sistemas de refrigeración térmica que ayuda a disminuir la temperatura del panel, mejorando su eficiencia eléctrica y prolongando su vida útil. Y, por consiguiente, es más viable escoger como líquido refrigerante al agua, ya que, mediante la implementación de un sistema híbrido, este puede ser aprovechado para su uso posterior.

Por otro lado, actualmente se está lidiando con el uso excesivo del suelo, ya que las instalaciones solares requieren grandes extensiones de terreno para generar cantidades significativas de energía, lo que puede entrar en conflicto con otros usos del

suelo, como la agricultura o la conservación del ecosistema. En entornos urbanos, la falta de espacio puede ser un obstáculo para la implementación de estas tecnologías.

Una buena manera de abordar el problema es la implementación de las optimizaciones presentadas que incrementan el valor de energía por metro cuadrado.

4.7. Contrastación de hipótesis

Durante la investigación se realizaron las siguientes hipótesis:

H. General: Los métodos usados nos ayudarán a mejorar la eficiencia energética de los sistemas fotovoltaicos que se puedan instalar en la ciudad de Piura.

H. Específica 1: Los modelos que se estudiarán nos permitirán conocer el grado de eficiencia aportado por cada uno de ellos.

H. Específica 2: El análisis que se realizará a cada propuesta de optimización nos brindará información respecto a los parámetros más relevantes en el diseño de paneles solares.

Según los resultados hallados, se puede afrontar la hipótesis general previamente estipulada.

Se demostró efectivamente que la eficiencia energética mejora con el método del sistema híbrido, para sistemas instalados en la ciudad de Piura, sin embargo, con el método del sistema de seguimiento solar técnicamente no mejoramos la eficiencia energética, ya que este no interviene en la conversión de energía, sino en la captación de rayos solares. Por lo que la hipótesis general se cumplió a medias.

En cuanto a la primera hipótesis específica, este la damos como válida, ya que el modelo estudiado en el presente trabajo si nos permitió calcular las eficiencias eléctricas y en otros caso, las térmicas. Esto se puede demostrar tomando en cuenta los resultados encontrados.

En la segunda hipótesis específica propuesta se puede comprobar que, efectivamente los análisis que realizamos a cada método de optimización nos dieron información de los parámetros afectados en el diseño. Por ejemplo, en el método de seguimiento solar, el parámetro principal estudiado fue la irradiancia POA, o radiación solar captada por el panel. En el caso del sistema híbrido, se tuvieron varios parámetros como la temperatura, el calor entregado, el flujo másico de agua, el área del captador, entre otros, que en conjunto afectaban exclusivamente a la eficiencia energética total.

4.8. Discusión de los resultados

El presente trabajo demostró a nivel teórico la mejora energética del sistema fotovoltaico en la implementación de diversas optimizaciones. Estos resultados fueron comparados con la literatura científica referenciada.

En las pruebas realizadas se usó un ángulo de inclinación más acorde al lugar en donde se realizaron. Por ejemplo en la investigación realizada por (Siuice, 2022) se calculó el ángulo óptimo para Junín, mediante la declinación solar y usando sensores, en donde el resultado fue de 10° . En nuestro caso, usamos 15° debido a la baja latitud del lugar y la cantidad de polvo que se puede encontrar, por lo que no es recomendable bajar demasiado el ángulo.

En el caso de los seguidores solares, los trabajos anteriores pudieron encontrar de manera experimental un aumento de eficiencia promedio del 20.24% para un eje luego de realizar el estudio durante unos días (Pacheco et al., 2020), mientras que, en nuestro caso realizado mediante simulaciones por software, encontramos un valor promedio de 27.833% para los 365 días del año, un intervalo de tiempo mucho más amplio. Por lo tanto, se llegó a la misma conclusión en cuanto al beneficio de la optimización y los parámetros afectados.

Se pudo demostrar de manera aproximada la relación entre la temperatura y la eficiencia eléctrica del panel, en un gráfico lineal. A favor de este resultado, en el trabajo

de (González Peña, 2019) queda representado en un gráfico como el incremento de la temperatura disminuye la potencia de salida de la celda solar hasta llegar a un régimen estacionario. Esto último no fue demostrado debido a que solamente se consideraron las especificaciones técnicas más generales para el estudio.

Los sistemas de refrigeración fueron extraídos del estudio de (Linares Rojo, 2022), en donde referenciamos sus valores promedio de aumento de eficiencia. Revisando una vez más el trabajo de (González Peña, 2019) se observó una misma conclusión, la mayor efectividad que poseen los paneles refrigerados por líquido frente a los paneles con PCM, además de que también es parte del sistema híbrido.

En cuanto al sistema híbrido, el resultado de la investigación presente arrojó un valor de 51.17% para la eficiencia total, lo que equivale a un incremento de un 31.67%, en contraposición con la literatura expuesta por (Jalca Cabañas et al., 2022), que trata de un sistema híbrido en Chachapoyas. Aquí se nos muestra una ganancia del 10% solamente. Esto se debe a las características de su colector térmico, el cual consiste solamente de un paralelepípedo rectangular de 1.63 m²; además, realizaron la prueba con una masa de agua de 70 kg. Estos 2 factores disminuyen mucho la energía térmica ganada en comparación con nuestro estudio que consistía en un modelo de mayor tamaño y configuración.

Conclusiones

- Se concluye que la implementación de seguidores solares mejora solamente la captación de rayos solares, en donde el de un eje incrementa en un 27.833% la radiación que incide en el panel solar, y el de dos ejes incrementa en un 37.284%.
- Tanto el nivel de mejora que ofrecen los seguidores solares, como la eficiencia térmica de los sistemas híbridos PVT son mayores en invierno que en verano, a pesar de que se consigue mayor energía solar en verano.
- En comparación con un panel solar simple sin ningún tipo de mejora, un panel solar híbrido PVT con sistema de seguimiento solar en un eje nos permite aprovechar la energía solar 2.8 veces más, y 3.1 veces más si el seguidor es de dos ejes. Esto es debido a que usamos la energía solar no solo para generar energía eléctrica, sino también para generar energía térmica.
- Un panel híbrido PVT aumenta la eficiencia total en más del doble, ya que también se considera la eficiencia térmica.
- La implementación de un sistema de refrigeración mejora hasta en un 21.85% la eficiencia eléctrica del panel, además de que aumenta su vida útil.
- El panel solar comercial más recomendable actualmente que genera mejores resultados es el panel de silicio monocristalino, con una eficiencia nominal aproximada de 21%.

Recomendaciones

- Se recomienda realizar estudios que analicen las mismas optimizaciones, pero enfocados en otras condiciones climáticas, como por ejemplo en las regiones andinas, ya que son zonas ideales para los paneles solares debido a sus bajas temperaturas y elevados niveles de radiación solar.
- Se debe incluir análisis experimentales en la zona y que estos puedan dar resultados más acorde a la realidad tomando en cuenta las limitaciones que posee la simulación mediante software.
- Se podría analizar los cálculos y resultados encontrados en instalaciones de paneles solares en techos inclinados de algunas viviendas, para poner a aumentar el alcance de la investigación.
- Es recomendable realizar un análisis económico incluyendo los costos e inversión requerida para la implementación de las optimizaciones presentadas, ya que así las empresas podrán conocer la viabilidad de proyectos solares con estas mejoras.

Referencias Bibliográficas

Atarama Montero, N. H. (2019). Evaluación del potencial de energía solar para generación de energía eléctrica, como una alternativa para disminuir el uso de combustibles fósiles en la región Piura [Tesis de Posgrado, Universidad Nacional de Piura]. <https://repositorio.unp.edu.pe/handle/UNP/1813>

Chiron de la Casinière, A., & Cachorro Revilla, V. E. (2008). La Radiación Solar en el sistema Tierra-Atmósfera. Ediciones Universidad de Valladolid. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/42812>

Dobos, A. (2014). PVWatts Version 5 Manual. 20 pp.; NREL Report No. TP-6A20-62641, <https://doi.org/10.2172/1158421>.

Gomes, A., do Nascimento Oliveira, M. F., & Musci, M. (2023). Optimal Tilt Angle of Photovoltaic Panels: A Case Study in the City of Rio de Janeiro. 12(2). <https://doi.org/10.5296/emsd.v12i2.20992>

González Peña, D. (2019). Optimización del diseño de panel solar híbrido para edificación [Tesis de Posgrado, Universidad de Burgos]. <https://doi.org/10.36443/10259/5399>

Green, M. A., Dunlop, E. D., Yoshita, M., Kopidakis, N., Bothe, K., Siefer, G., Hinken, D., Rauer, M., Hohl-Ebinger, J., & Hao, X. (2024). Solar cell efficiency tables (Version 64). Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 32(7), 425-441. <https://doi.org/10.1002/pip.3831>

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu,

and B. Zhou (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001.

IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)). IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

Jalca Cabañas, E., Espinoza Canaza, F., Gosgot Angeles, W., & Rivera López, R. Y. (2022). Análisis energético de un sistema híbrido fotovoltaico-térmico bajo las condiciones climáticas de Chachapoyas, Amazonas, Perú. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 6(1), 66-73. <https://doi.org/10.25127/aps.20221.856>

Khoyi, A. K., & Shahhoseini, A. (2020). The effect of consuming energy on the output power of a photovoltaic tracking system, case study: Urban area in Tehran. 2020 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICEE50131.2020.9260782>

Kreuter, A., Buras, R., Mayer, B., Webb, A., Kift, R., Bais, A., Kouremeti, N., & Blumthaler, M. (2014). Solar irradiance in the heterogeneous albedo environment of the Arctic coast: Measurements and a 3-D model study. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(12), 5989-6002. <https://doi.org/10.5194/acp-14-5989-2014>

Linares Rojo, F. D. (2022). Efecto de la temperatura en paneles solares fotovoltaicos y tecnologías de refrigeración para el mejoramiento de la eficiencia [Tesis de Pregrado, Instituto Tecnológico Metropolitano]. <https://repositorio.itm.edu.co/handle/20.500.12622/5727>

Marion, W.; Adelstein, J.; Boyle, K.; Hayden, H.; Hammond, B.; Fletcher, T.; Canada, B.; Narang, D.; Shugar, D.; Wenger, H.; Kimber, A.; Mitchell, L.; Rich, G.;

Townsend, T. (2005). Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems. Proc. of 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference, January 2005, Lake Buena Vista, Florida.

Pacheco, M., Tapia, I., & Guevara, E. (2020). Diseño e implementación de un seguidor solar de un eje para la optimización de un sistema fotovoltaico de 100 W aplicando cálculos matemáticos y automatización industrial. 4(3), 336-354. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v4i3.1359>

Pareja Aparicio, M. (2010). Radiación solar y su aprovechamiento energético. MARCOMBO S.A.

Perez Carretero, J. (2018). Estudio sobre sistemas híbridos térmico-fotovoltaicos (PVT): Caracterización, diseño de bancos de ensayo e investigación de mejoras de la eficiencia [Tesis de Pregrado]. Universidad Politécnica de Madrid.

Siuce, E. (2022). Ángulo de inclinación óptimo para incrementar la potencia eléctrica de generación del panel solar fotovoltaico de la Universidad Nacional del Centro del Perú [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/8318>

Soomar, A. M., Hakeem, A., Messaoudi, M., Musznicki, P., Iqbal, A., & Czapp, S. (2022). Solar Photovoltaic Energy Optimization and Challenges. Frontiers in Energy Research, 10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.879985>

Stephens, K., & Angel, J. R. P. (2012). Comparison of collection and land use efficiency for various solar concentrating field geometries (K. VanSant & A. P. Plesniak, Eds.; Vol. 8468, p. 846804). <https://doi.org/10.1117/12.930240>

Vera Alvarado, E. (2014). Sustentabilidad energetica para casas habitacion: Energia Solar [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Autonoma de Mexico]. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000710789>

Anexo

Anexo A: Matriz de Consistencia.....	84
---	----

Anexos

Anexo A: Matriz de Consistencia

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Indicadores	Metodología
General: ¿Qué tan factible será la implementación de diversas optimizaciones realizadas a un sistema de paneles solares considerando las condiciones climáticas de la ciudad de Piura?	General: Analizar energéticamente la eficiencia de las diversas optimizaciones realizadas a diseños de paneles solares, usando las condiciones climatológicas de la ciudad de Piura.	General: Los métodos usados nos ayudarán a mejorar la eficiencia energética de los sistemas fotovoltaicos que se puedan instalar en la ciudad de Piura.	VI: Método de Optimización	Conceptos de diseño.	Tipo de diseño del sistema fotovoltaico (simple, híbrido)	Tipo, enfoque y alcance: La investigación tiene un enfoque cuantitativo y es del tipo aplicado. Posee un alcance descriptivo-comparativo
				Tipo de material.	Tipo de celda fotovoltaica (monocristalina, policristalina, etc.)	
				Implementación de técnicas de enfriamiento	Disminución de la temperatura de operación.	Diseño: El diseño de la investigación es no experimental, transversal, dado que se analizarán datos existentes en un tiempo determinado y sin manipular las variables.
				Implementación de técnicas de seguimiento solar.	Angulo de inclinación del panel.	
Específicos: ¿Qué clase de mejora realizada a la instalación de paneles fotovoltaicos es la que más repercute positivamente en la eficiencia de dicho sistema? ¿En qué medida los cálculos y formulación de la solución nos permitirá desarrollar un riguroso análisis entre las distintas optimizaciones realizadas a diferentes parámetros en un sistema fotovoltaico?	Específicos: - Formar relaciones entre los parámetros que corresponden al diseño de paneles fotovoltaicos nos puedan representar su grado de impacto en la potencia eléctrica entregada. - Determinar el nivel de impacto de las condiciones climatológicas de Piura a la eficiencia de los sistemas PV.	Específicos: - Los modelos que se estudiarán nos permitirán conocer el grado de eficiencia aportado por cada uno de ellos. - El análisis que se realizará a cada propuesta de optimización nos brindará información respecto a los parámetros más relevantes en el diseño de paneles solares.	VD: Eficiencia energética		Porcentaje de eficiencia.	Población: Está definida por todos los sistemas fotovoltaicos que podrían ser implementados en la ciudad de Piura
				Rendimiento energético	Relación kWh generados por m ² de panel instalado.	
				Comportamiento debido a la temperatura.	Variación de eficiencia por temperatura.	Muestra: Comprende los paneles solares con sistemas de seguimiento solar y los sistemas híbridos PV-T