



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERIA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LA BOMBA DE
CALOR ALIMENTADA POR ENERGÍA FOTOVOLTAICA
PARA EL CALENTAMIENTO DE AGUA**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO ELECTRICO**

AUTOR: MARIO FRANCISCO LOAYZA ROMAN

DIRECTOR: MGTR. OSCAR MAURICIO SIGUENCIA SIGUENZA.

CUENCA - ECUADOR

2025

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LA BOMBA DE CALOR
ALIMENTADA POR ENERGÍA FOTOVOLTAICA PARA EL
CALENTAMIENTO DE AGUA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

AUTOR: Mario Francisco Loayza Román.

DIRECTOR: Mgtr. Oscar Mauricio Siguenza Siguenza.

CUENCA - ECUADOR

2024

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD

Yo, Mario Francisco Loayza Román portador de la cedula de ciudadanía N.º 0706330628. Declaro ser el autor de la obra: Evaluación del rendimiento de la bomba de calor alimentada por energía fotovoltaica para el calentamiento de agua, sobre el cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que esta obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 24 de enero de 2025



Mario Francisco Loayza Román

0706330628

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Mario Francisco Loayza Román, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized initial 'O' followed by several loops and a final flourish.

Mgtr. Oscar Mauricio Siguenza Siguenza.

DIRECTOR

DEDICATORIA

A mis padres, por su amor incondicional, su apoyo constante y su ejemplo de perseverancia. Este logro es también el suyo.

A mi hermana y abuelito Fernando por creer en mí y guiarme con sabiduría.

Finalmente, a todos aquellos que, de una manera u otra, han contribuido a hacer realidad este sueño. Gracias por ser parte de este camino.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseo expresar un sincero agradecimiento Al Ing, Mauricio Siguenca por su guía, apoyo y paciencia durante este proceso. Su conocimiento y dedicación han sido esenciales para la culminación de este trabajo. Sin su orientación, este proyecto no habría alcanzado sus objetivos.

Asimismo, agradezco a la Universidad Católica de Cuenca por brindar las herramientas y oportunidades necesarias para desarrollar esta investigación. De igual manera, reconozco la contribución de profesores y compañeros, cuyos comentarios y sugerencias enriquecieron significativamente este proyecto.

Un agradecimiento especial a Eliana y mi familia, cuyo apoyo incondicional fue fundamental durante esta etapa. Su comprensión y ánimo resultaron indispensables para superar los desafíos encontrados en el camino.

RESUMEN

Este estudio evaluó el rendimiento térmico y energético de un sistema de bomba de calor alimentado por energía fotovoltaica para calentamiento de agua sanitaria en una vivienda residencial. El dimensionamiento del sistema consideró el requerimiento de agua caliente destinada al consumo doméstico, el gasto energético asociado al funcionamiento de la bomba de calor y la capacidad de generación mediante paneles solares. Además, se analizó la eficiencia del sistema y su viabilidad económica mediante indicadores como el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

El procedimiento utilizado contempló la recopilación sistemática de datos sobre el uso del agua caliente sanitaria mediante una encuesta y la caracterización del recurso solar. También se seleccionaron y dimensionaron los componentes del sistema, como la bomba de calor, los tanques de almacenamiento y el sistema fotovoltaico. Mediante simulaciones en MATLAB, se analizó el comportamiento térmico de los tanques y la variabilidad energética diaria y anual. Finalmente, se evaluó la viabilidad económica considerando la inversión inicial, los costos operativos y los ahorros en electricidad.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el sistema fotovoltaico puede abastecer la energía requerida por la bomba de calor, generando además energía sobrante en algunos períodos del año. Los cuales se emplearon para abastecer de manera parcial la carga del edificio. Sin embargo, los indicadores económicos de viabilidad VAN y TIR no fueron favorables.

Palabras clave: bomba de calor, energía fotovoltaica, agua caliente sanitaria, viabilidad económica, eficiencia energética

ABSTRACT

This study assessed the thermal and energy performance of a photovoltaic-powered heat pump system for domestic water heating in a residential home. The system sizing considered the demand for domestic hot water (DHW), the energy consumption of the heat pump, and the photovoltaic generation capacity. In addition, the system's efficiency and economic viability were analyzed using indicators such as the Net Present Value (NPV) and Internal Rate of Return (IRR).

The methodology included the collection of data on DHW consumption through a survey and the characterization of the solar resource. System components, such as the heat pump, storage tanks, and photovoltaic system, were also selected and sized. MATLAB simulations were used to analyze the thermal behavior of the tanks as well as the daily and annual energy variability. Finally, the economic viability was assessed by considering the initial investment, operating costs, and electricity savings.

The results showed that the photovoltaic system can cover the demand of the heat pump and generate surpluses in certain months, which were partially used to supply the building's energy load. However, the economic viability indicators, NPV and IRR, were not favorable.

Keywords: heat pump, photovoltaic energy, domestic hot water, economic viability, energy efficiency

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABLAS.....	xiii
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCION.....	1
1.1. Formulación del problema.....	5
1.2. Objetivos.....	6
1.3. Justificación	7
CAPÍTULO 2	8
2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. Estado del arte.....	8

2.2. Sistema de generación fotovoltaica.....	13
2.2.1. El sol y su radiación.....	15
2.2.2. Espectro de radiación.....	15
2.2.3. Recurso solar.....	16
2.2.4. Horas pico de sol.....	17
2.3. Bomba de calor.....	18
2.3.1. Definición y funcionamiento de las bombas de calor.....	19
2.3.2. Tipos de bomba de calor.....	19
2.3.2.1. Bombas de calor aire-agua.....	19
2.3.2.2. Bomba de calor agua-agua.....	20
2.3.2.3. Bombas de calor geotérmicas.....	21
2.3.3. Ciclo de refrigeración por compresión de vapor.....	22
2.3.4. Factores que influyen en el rendimiento de las bombas de calor.....	22
2.3.5. Coeficiente de rendimiento (COP) y eficiencia estacional (SPF).....	23
2.4. Ciclo de compresión de vapor.....	23
2.5. Eficiencia de ciclo de compresión de vapor.....	24
2.6. Beneficios y aplicaciones.....	24
CAPÍTULO 3.....	26
3. ENFOQUE MATEMÁTICO PARA LA MODELACIÓN.....	26
3.1. Entorno analizado.....	26
3.2. Evaluación del uso energético en el edificio.....	27
3.3. Análisis de consumo de agua caliente en el caso de estudio.....	28
3.3.1. Pregunta 1: Número de personas en la vivienda.....	28
3.3.2. Pregunta 2: Tipo de vivienda.....	29
3.3.3. Pregunta 3: Ubicación en el edificio.....	29
3.3.4. Pregunta 4: ¿Qué tipo de medio de calentamiento de agua utiliza en su hogar?.....	30
3.3.5. Pregunta 5: ¿En qué horarios utiliza agua caliente?.....	30

3.3.6. Pregunta 6: ¿Cuánto tiempo suele durar cada ducha?	31
3.3.7. Pregunta 7: Número promedio de duchas diarias por persona en su hogar	31
3.3.8. Pregunta 8: ¿Utiliza agua caliente para otros fines?	32
3.3.9. Pregunta 9: Para las duchas, ¿En qué horarios suelen realizarse?	32
3.3.10. Pregunta 10: Para otras actividades (lavado de platos, manos, ropa), indique el horario típico de uso de agua caliente	33
3.4. Evaluación del consumo de agua en la edificación	34
3.5. Sistema propuesto para el ACS	34
3.6. Proceso de selección para la bomba de calor	35
3.6.1. Paso 1: Determinación de la carga térmica para ACS	35
3.6.2. Paso 2: Cálculo de la capacidad térmica instantánea requerida	36
3.6.3. Paso 3: Análisis de la potencia eléctrica necesaria para el sistema de la bomba de calor	37
3.6.4. Paso 4: Dimensionamiento de capacidad de depósito primario	38
3.6.5. Paso 5: Dimensionamiento de tanque auxiliar	38
3.6.6. Paso 6: Estimación de demanda energética de ACS.....	39
3.7. Condiciones ambientales en la zona de estudio.....	40
3.8. Análisis del recurso solar	41
3.8.1. Comportamiento diario	41
3.8.2. Análisis del comportamiento mensual.....	42
3.8.3. Análisis del comportamiento anual	44
3.8.4. Horas solares pico (HSP)	45
3.9. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico.....	46
3.9.1. Selección de panel fotovoltaico	46
3.9.2. Cálculo de la eficiencia del sistema	47
3.9.3. Energía genera por panel	48
3.9.4. Número de paneles requeridos.....	49
3.9.5. Disposición del esquema fotovoltaico	49

3.9.6. Selección del inversor.....	50
3.9.7. Análisis del espacio requerido	51
3.10. Balance energético	51
3.11. Aprovechamiento del excedente energético.....	52
4. CAPÍTULO 4	53
4.1. Análisis de resultados horarios.....	53
4.2. Análisis de resultados mensuales	56
4.3. Análisis económico	58
4.3.1. Costos iniciales del sistema.....	58
4.3.2. Costos operativos anuales	59
4.3.3. Ahorro en consumo de energía	60
4.3.4. Cálculo del retorno de la inversión.....	60
4.3.4.1. Cuantificación del VAN.....	60
4.3.4.2. Análisis del TIR	61
5. CONCLUSIONES.....	62
6. RECOMENDACIONES.....	63
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema fotovoltaico sin conexión a la red eléctrica.....	13
Figura 2. Ubicación geográfica para producción solar.....	14
Figura 3. Condiciones climáticas que afectan a los paneles solares.	14
Figura 4. Espectro solar de radiación.....	16
Figura 5. Interacción de la radiación.	17
Figura 6. Variación de la irradiancia solar a lo largo del día.	18
Figura 7. Proceso de transferencia de calor.....	19
Figura 8. Proceso de transferencia de calor.....	20
Figura 9. Proceso de transferencia de calor, bomba de calor agua-agua.....	21
Figura 10. Proceso de transferencia de calor bomba geotérmica.....	22
Figura 11. Edificación seleccionada para el estudio.....	26
Figura 12. Ubicación del edificio de estudio.	27
Figura 13. Exploración del gasto energético.	27
Figura 14. Número de personas en la vivienda de estudio.....	28
Figura 15. Tipo de vivienda.....	29
Figura 16. Ubicación en el edificio de las personas.....	29
Figura 17. Medios de calentamiento de agua usados en el hogar.....	30
Figura 18. Horario de consumo de ACS.....	30
Figura 19. Tiempo de duración de duchas.	31
Figura 20. Número de duchas por persona.	32
Figura 21. ACS para otros fines.	32
Figura 22. Horarios de uso de la ACS.....	33
Figura 23. Horarios principales de uso de la ACS.	33
Figura 24. Comportamiento horario del agua en el sitio de estudio.....	34
Figura 24. Esquema de ACS propuesto.....	35
Figura 26. Comportamiento climático en zona de estudio.....	40
Figura 27. Comportamiento representativo diario de irradiancia en zona de estudio.....	41

Figura 28. Variabilidad diaria de irradiancia en zona de estudio.....	42
Figura 29. Comportamiento mensual de irradiancia de enero a junio en zona de estudio. ...	43
Figura 30. Comportamiento mensual de irradiancia de julio a diciembre en zona de estudio.	44
Figura 31. Comportamiento anual de irradiancia en zona de estudio.	45
Figura 32. Energía requerida según comportamiento de ACS.	53
Figura 33. Energía demanda por la bomba de calor y energía generada por el sistema fotovoltaico.	54
Figura 34. Potencia térmica necesaria y energía generada por el sistema fotovoltaico.....	55
Figura 35. Comportamiento de la temperatura de los tanques con referencia a la ACS.....	56
Figura 36. Comparativa de energía mensual demandada por la bomba de calor y la energía generada por el sistema fotovoltaico.....	57
Figura 37. Balance energético mensual.	58

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Factores clave en el rendimiento de la bomba de calor.....	23
Tabla 2. Estimación de consumo de bomba de calor anual.	39
Tabla 3. Estimación del número de horas solares pico en zona de estudio	45
Tabla 4. Comparativa de paneles solares.....	47
Tabla 5. Comparativa de paneles solares.....	50
Tabla 6. Características técnicas del inversor seleccionado.	50
Tabla 7. Balance energético del sistema diseñado.	51
Tabla 8. Balance energético considerando excedente de energía.	52
Tabla 8. Costo inicial del sistema de calentamiento de ACS con bomba de calor.....	59
Tabla 9. Costo operativos anuales del sistema de calentamiento de ACS con bomba de calor	59

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCION

En la actualidad, el calentamiento de agua en edificios residenciales se realiza principalmente mediante métodos tradicionales, como calderas de gas, calentadores eléctricos y sistemas de calefacción central. Aunque estos métodos son ampliamente utilizados, presentan limitaciones significativas, por ejemplo, las calderas de gas dependen de combustibles fósiles, lo que contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero (Yeom et al., 2019). Por otro lado, los calentadores eléctricos pueden ser menos eficientes y costosos, especialmente en regiones con tarifas eléctricas elevadas (Samarin, 2020). Además, ambos métodos suelen implicar un alto consumo energético, lo que puede resultar en mayores costos operativos y una mayor huella de carbono (Kordana-Obuch et al., 2021).

La preocupación cada vez mayor frente al cambio climático y la urgencia de disminuir las emisiones de dióxido de carbono han motivado la exploración de opciones energéticas más sostenibles. En este contexto, las fuentes renovables, entre ellas la solar y la eólica, representan una alternativa efectiva para reducir el uso de combustibles fósiles y aminorar el impacto sobre el medioambiente (Panagiotidou et al., 2020). La adopción de tecnologías que aprovechan estas fuentes de energía puede contribuir significativamente a la sostenibilidad y a la reducción de la huella de carbono de los edificios residenciales (Meng et al., 2022). Asimismo, el uso de energías renovables puede ayudar a mejorar la eficiencia energética y a reducir los costos operativos a largo plazo (Ratajczak et al., 2021).

Se ha comprobado que tanto las bombas de calor como la tecnología solar fotovoltaica son soluciones eficientes y respetuosas con el entorno. Las bombas de calor, que funcionan mediante el uso de energía eléctrica para mover calor de un lugar a otro, son particularmente efectivas para el calentamiento de agua y la climatización de edificios (Heidari et al., 2021). Cuando se combinan con sistemas fotovoltaicos, que convierten la luz solar en electricidad, se puede lograr una solución integral y sostenible (Cholewa & Siuta-Olcha, 2021). La integración de estas tecnologías permite no solo la generación de calor y electricidad de manera eficiente, sino también la reducción de la dependencia de la red eléctrica y la minimización de las emisiones de gases de efecto invernadero (Hamburg et al., 2021).

La necesidad de integrar tecnologías sostenibles en el calentamiento de agua residencial es clara, dada la dependencia de métodos tradicionales que resultan costosos y dañinos para el medio ambiente. En este contexto, las bombas de calor y los sistemas fotovoltaicos ofrecen una alternativa eficiente y ecológica, al reducir tanto las emisiones de CO₂ como los costos operativos. Para comprender mejor su impacto, es necesario revisar

estudios recientes que analicen el rendimiento de sistemas híbridos fotovoltaico-bomba de calor.

Obalanlege et al. (2020) evaluaron un sistema híbrido de bomba de calor y fotovoltaico-térmico (PVT) para calefacción y electricidad residencial. Utilizaron un análisis de transferencia de calor y termodinámico en estado casi estacionario, con pasos de tiempo incrementales, para resolver los cambios de temperatura de los fluidos. Se determinó que el COP mínimo de la bomba de calor fue de 4.2, y que la eficiencia del PVT mejoraba a medida que aumentaban las tasas de flujo de agua y los tamaños de los tanques. Concluyeron que el sistema híbrido PVT muestra alta eficiencia y potencial para mejorar la eficiencia energética en residencias.

Li & Sun (2019) investigaron el rendimiento energético y socioeconómico de un sistema novedoso de bomba de calor asistida por solar y bucle de calor fotovoltaico (PV-LHP/SAHP) para calentamiento de agua. A través de simulaciones teóricas, optimizaron parámetros estructurales y analizaron estrategias de operación. Descubrieron que el sistema podía reducir el consumo eléctrico en un 79.4% y las emisiones de CO₂ en un 73.9%, mejorando la fracción de calefacción solar y la relación de suministro eléctrico. Concluyeron que el sistema PV-LHP/SAHP es prometedor para aplicaciones domésticas en climas fríos, superando a las bombas de calor tradicionales.

Liu et al. (2023) desarrollaron una investigación práctica sobre la combinación de sistemas híbridos fotovoltaicos-térmicos con bombas térmicas orientadas a climatizar construcciones. Durante condiciones típicas del invierno, evaluaron la eficiencia operativa de una bomba térmica específica, la cual obtuvo un coeficiente de rendimiento (COP) promedio de 5.66, junto con una generación fotovoltaica de 107.5 W. Además, el sistema de calefacción mediante piso radiante consiguió mantener rápidamente la temperatura interior en 20.47°C, utilizando agua suministrada a 50°C. Estos hallazgos confirmaron que la integración del sistema híbrido PVT con bombas térmicas es efectiva para proveer calefacción durante los meses fríos.

Zhou et al. (2023) evaluaron un sistema PVT de una sola etapa durante las estaciones de transición e invierno en China. Realizaron investigaciones experimentales y encontraron que el sistema mantenía un COP promedio de 5 en la temporada de transición y 4.4 en invierno, con eficiencias de potencia fotovoltaica del 11.9% y 10.2%, respectivamente. Concluyeron que el sistema PVT de una sola etapa es eficiente y estable para calefacción de espacios y suministro de agua caliente en climas fríos.

Lorenzo & Narvarte (2019) revisaron las soluciones y los indicadores clave de rendimiento (KPIs) utilizados en los sistemas de bombas de calor fotovoltaicas. A través de

un análisis teórico de KPIs tradicionales, propusieron nuevos KPIs para evaluar no solo la calidad de la bomba de calor y el sistema fotovoltaico, sino también la integración y el carácter renovable del sistema completo. Destacaron la necesidad de estándares comunes para comparar futuros trabajos en este campo y concluyeron que los nuevos KPIs son necesarios para evaluar de manera más completa la calidad de los sistemas PV-HP.

Abu-Rumman et al., (2020) plantearon un sistema híbrido compuesto por bomba térmica geotérmica y tecnología fotovoltaico-térmica (PV/T-GSHP), con el fin de disminuir el consumo de electricidad en sistemas de calefacción en edificaciones de Jordania. Realizaron simulaciones mediante el software TRNSYS para evaluar el desempeño del sistema propuesto. Según los resultados obtenidos, se evidenció un incremento en la eficiencia de generación eléctrica, así como un aumento en el coeficiente de rendimiento (COP) del sistema durante el periodo de calefacción, lo que permitió una reducción del consumo eléctrico del 25.7%. Finalmente, concluyeron que el sistema híbrido PV/T-GSHP representa una alternativa eficiente y económicamente viable para la climatización de edificios en Jordania.

Riaz et al. (2023) evaluaron un sistema fotovoltaico-térmico montado en fachada, asistido por una bomba de calor. Realizaron una investigación experimental bajo condiciones climáticas expuestas y encontraron que el sistema demostró una eficiencia térmica promedio del 77.6% y un COP de 4.41 durante el calentamiento de agua. La temperatura del aire de enfriamiento alcanzó un mínimo de 15°C. Concluyeron que el sistema es altamente eficiente y adecuado para la generación de energía múltiple en edificios.

Zhou et al., (2019) investigaron un sistema de bomba de calor fotovoltaico-térmico de rollo combinado para calefacción, refrigeración y suministro de energía. Realizaron investigaciones experimentales y desarrollaron modelos matemáticos para evaluar el rendimiento del sistema. Encontraron que el sistema demostró alta eficiencia en la conservación de energía, proporcionando refrigeración, agua caliente y electricidad de manera eficiente y estable. Concluyeron que el sistema de rollo combinado tiene un alto potencial para la conservación de energía en edificios.

Fu et al. (2019) compararon el rendimiento de sistemas fotovoltaico-térmicos con diferentes métodos de circulación. Configuraron y probaron tres sistemas PV/T con diferentes métodos de circulación y encontraron que el sistema con bomba fotovoltaica directa mostró el mejor rendimiento térmico, con la mayor eficiencia energética y exergética. Concluyeron que, aunque los sistemas con circulación natural tienen una mayor eficiencia energética global, el sistema con bomba fotovoltaica directa tuvo el mejor rendimiento térmico.

Vaishak & Bhale (2021) analizaron el rendimiento de un sistema fotovoltaico-térmico basado en bomba de calor (PV/T-SAHP) usando refrigerante como fluido de transferencia de

calor. Realizaron un análisis experimental de un sistema PV/T-SAHP y predijeron el rendimiento anual utilizando un modelo numérico validado. Los resultados mostraron una mejora del 15.20% en la eficiencia eléctrica promedio y un COP de 2.96. Concluyeron que el sistema PV/T-SAHP es eficiente para la conversión de energía y adecuado para aplicaciones residenciales.

Choi et al. (2020) analizaron un equipo híbrido basado en una bomba térmica para calentamiento de agua conectado a un colector fotovoltaico-térmico que emplea aire. Evaluaron el comportamiento del sistema PV/T bajo condiciones ambientales reales. Según los resultados obtenidos, el colector PV/T presentó una eficiencia total de 46.89%, lo que implicó una mejora en la producción eléctrica respecto a un módulo fotovoltaico convencional. Finalmente concluyeron que el sistema PV/T con soporte de bomba térmica incrementa significativamente no solo la eficiencia térmica de la bomba, sino que también beneficia la producción eléctrica del módulo fotovoltaico.

Y. Liu et al. (2023) realizaron simulaciones del comportamiento dinámico de un sistema de cogeneración basado en una bomba térmica asistida por tecnología fotovoltaico-térmica de baja concentración durante el periodo de calefacción. Utilizaron el software TRNSYS para las simulaciones y encontraron que el sistema mantuvo una temperatura constante de 20°C en la habitación y un COP de 5, con una producción térmica cuatro veces mayor que la generación de electricidad. Concluyeron que el sistema cogenerativo PV/T de baja concentración es eficiente y estable para la calefacción de espacios.

Obalanlege et al. (2020) analizan el efecto de los ciclos cortos en un sistema híbrido fotovoltaico-térmico con bomba de calor. Mediante un experimento con un módulo fotovoltaico-térmico integrado a una bomba de calor, observan que el enfriamiento de la superficie a 33 °C incrementa un 0,7% la eficiencia fotovoltaica. Además, el sistema logra un COP de 7 en la bomba, mejorando su rendimiento. Los autores concluyen que este enfriamiento reduce la frecuencia de ciclos cortos, optimizando así la estabilidad operativa del sistema.

Mahdi & Gaddoa (2020) optimizaron un sistema de bombeo solar fotovoltaico para el calentamiento de agua en el clima de Irak. Realizaron experimentos con tres configuraciones diferentes de arreglo fotovoltaico (4S, 2S × 2P y 4P) bajo condiciones climáticas soleadas y encontraron que la configuración de arreglo fotovoltaico (2P × 2S) proporcionó la energía óptima y el volumen de agua máximo durante el día. Concluyeron que el diseño óptimo del arreglo fotovoltaico es crucial para la eficiencia del sistema de bombeo solar.

Sakellariou & Axaopoulos (2020) introdujeron un nuevo índice de rendimiento energético para sistemas de bomba de calor geotérmica asistidos por fotovoltaico-térmico

(PVT-SAGSHP). A través de un análisis paramétrico utilizando un modelo validado en TRNSYS, encontraron que el índice de fracción de potencia renovable (RPF) era el más adecuado para evaluar el rendimiento energético del sistema, superando las limitaciones del factor de rendimiento estacional (SPF). Concluyeron que el índice RPF proporciona una evaluación más completa del rendimiento energético de los sistemas equipados con PVT.

Los estudios evidencian la efectividad de los sistemas térmicos fotovoltaicos en climatización y calentamiento de agua. Es necesario analizar estos sistemas bajo diferentes condiciones climáticas y operativas para garantizar su eficiencia en diversas regiones geográficas. Además, se requiere un análisis a largo plazo del desempeño y la durabilidad de estos sistemas, así como la evaluación de su viabilidad económica en distintos contextos. También es importante investigar la integración y el control de estos sistemas para maximizar su eficiencia y minimizar costos y emisiones. Finalmente, el desarrollo de estándares comunes para medir y comparar el rendimiento de estos sistemas ayudaría a consolidar su adopción en el mercado residencial.

1.1. Formulación del problema

La tecnología de bombas de calor y el uso de energía fotovoltaica han emergido como soluciones prominentes para la generación eficiente de agua caliente en aplicaciones residenciales y comerciales. Las bombas de calor funcionan transfiriendo calor de una fuente externa al agua, utilizando una cantidad mínima de energía eléctrica. La energía fotovoltaica, por otro lado, convierte la luz solar directamente en electricidad, ofreciendo una fuente de energía renovable y limpia. En combinación, estos sistemas prometen una solución altamente eficiente y sostenible para el calentamiento de agua (Zhou et al., 2023b).

Los sistemas térmicos de bombas de calor fotovoltaicas ofrecen una alternativa sostenible frente a métodos convencionales de calentamiento de agua. Esta tecnología mejora el rendimiento y reduce costos operativos al aprovechar energía solar. Estudios recientes demuestran que reducen el consumo energético en un 54,9% comparado con sistemas de resistencia eléctrica (DAIKIN, 2023). Por ello, su eficiencia las posiciona como soluciones viables para aplicaciones residenciales y comerciales.

Estudios previos demuestran la alta eficiencia de las bombas de calor fotovoltaicas, con coeficientes de rendimiento (COP) promedio de 5,66 (C. Liu et al., 2023b). Además, estos sistemas registran un factor de desempeño anual de 8,92 (Aguilar et al., 2016), mientras que los colectores solares térmicos alcanzan eficiencias cercanas al 70% (Wanjiku et al., 2022). Este valor (8,92) implica que, por cada unidad de energía eléctrica consumida, se generan 8,92 unidades térmicas aprovechables, equivalente a un 792% de eficiencia.

El sistema de bomba de calor con energía fotovoltaica presenta múltiples ventajas. Su eficiencia energética, situada en 8.92 es competitiva con la de los sistemas de colectores solares térmicos (Aguilar et al., 2016). Además, la electricidad generada puede utilizarse para otros dispositivos eléctricos en la vivienda, proporcionando flexibilidad y optimización del uso de energía. La integración con sistemas de control avanzados permite optimizar el rendimiento según las condiciones climáticas y las necesidades específicas, algo que no es tan fácil de implementar con los colectores solares térmicos. La integración de colectores solares térmicos reduce emisiones de carbono al emplear energía solar, disminuyendo la huella ambiental en hogares y promoviendo la sustentabilidad. Sin embargo, este enfoque plantea cuestiones clave que requieren análisis exhaustivo para optimizar su eficacia técnica y económica en comparación con métodos convencionales.

Con esta premisa, es posible plantear las soluciones frente a las siguientes interrogantes.

¿Cuáles son los principales retos técnicos y económicos que presentan las bombas de calor con energía fotovoltaica en contraste con los métodos convencionales de calentamiento de agua?

¿Qué efectos tendría una adopción masiva de sistemas de bomba de calor con energía fotovoltaica en la mitigación de gases de efecto invernadero y en la sostenibilidad, en comparación con las tecnologías tradicionales para el calentamiento de agua?

¿Cuál sería el tiempo estimado de recuperación de inversión al implementar bombas de calor alimentadas con energía solar en una vivienda promedio y cómo se compararía con los métodos convencionales en términos de costos a largo plazo?

1.2. Objetivos

Objetivo general

Evaluar el rendimiento térmico y energético de un sistema de bomba de calor alimentada por energía fotovoltaica para el calentamiento de agua sanitaria, mediante el diseño del sistema y el análisis de la eficiencia del sistema propuesto, para la reducción del consumo de energía destinada al calentamiento de agua en una edificación.

Objetivos específicos

- Dimensionar los requerimientos energéticos y técnicos del sistema de bomba de calor y energía solar fotovoltaica para el calentamiento de agua sanitaria en el

edificio seleccionado, mediante el levantamiento de información en sitio, para que el diseño del sistema sea adecuado.

- Analizar el rendimiento energético del sistema de bomba de calor alimentados por energía solar fotovoltaica, evaluando la relación entre la energía térmica generada y la energía eléctrica suministrada por los paneles solares, con el fin de la comprobación de la eficiencia del sistema.
- Evaluar la viabilidad técnica de la integración de bombas de calor y sistemas fotovoltaicos en edificios residenciales, considerando aspectos como el diseño del sistema y los requisitos de mantenimiento y operación, para la corroboración de la eficiencia energética del sistema integrado.
- Realizar un análisis económico asociado a la propuesta de implementación del sistema de bomba de calor alimentados por energía solar fotovoltaica, comparando los costos iniciales, los costos operativos y los ahorros en el consumo de energía, así como calculando el retorno de inversión (ROI), para la determinación de la viabilidad económica.

1.3. Justificación

El estudio sobre bombas de calor fotovoltaicas para calentamiento de agua es relevante en Ecuador, donde mejorar la eficiencia energética y reducir la dependencia de fuentes no renovables son prioridades. En el sector residencial, el 25% de la energía se destina a agua sanitaria (Morales & Sauer, 2001; Pesántez, 2007; Suárez, 2015). Por ello, implementar estas bombas surge como solución clave para optimizar sostenibilidad y rendimiento en el contexto local.

Las bombas de calor fotovoltaicas reducirían sustancialmente los gases de efecto invernadero (GEI) en Ecuador. Proyecciones indican que su uso en calentamiento de agua disminuiría un 31,5% las emisiones de CO₂ hacia 2030 (Arroyo & Miguel, 2020). Las políticas energéticas nacionales, al promover la transición de GLP a electricidad en hogares, facilitan su adopción (Acuna et al., 2016).

Como se ha señalado, evaluar el rendimiento de bombas de calor fotovoltaicas en Ecuador es relevante por su dimensión técnico-económica y ambiental. Este análisis proporciona datos esenciales para optimizar el uso de energías renovables nacionales. Además, contribuye a impulsar prácticas sostenibles en sectores residenciales.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

La fundamentación teórica es esencial para comprender y contextualizar la integración de sistemas fotovoltaicos y bombas de calor en el ámbito del calentamiento de agua sanitaria. Esta sección explorará los conceptos básicos y los principios de funcionamiento de estos sistemas, así como su integración eficiente.

2.1. Estado del arte

El calentamiento global y la dependencia de combustibles fósiles son problemas críticos que afectan a todo el planeta. A medida que la población mundial crece, la demanda de energía sigue aumentando, exacerbando la emisión de gases de efecto invernadero. Esta dependencia energética no solo tiene impactos ambientales, sino que también genera vulnerabilidades económicas y políticas debido a la fluctuación de los precios del petróleo y la geopolítica relacionada con su suministro. En respuesta, muchas naciones están buscando alternativas más sostenibles y renovables para satisfacer sus necesidades energéticas. En este contexto, la energía solar emerge como una solución viable y sostenible, dado que es una fuente inagotable y tiene un menor impacto ambiental en comparación con los combustibles fósiles.

Dentro del ámbito de la energía solar, las tecnologías fotovoltaicas han experimentado un avance significativo, permitiendo una mayor captación y aprovechamiento de la energía solar. Sin embargo, la implementación a gran escala de estas tecnologías enfrenta desafíos relacionados con la intermitencia de la generación solar y la necesidad de almacenamiento eficiente para garantizar un suministro continuo de energía. Además, la infraestructura existente a menudo no está preparada para integrar de manera eficiente estas tecnologías, lo que requiere inversiones en actualizaciones de redes eléctricas. A pesar de estos retos, los avances tecnológicos continúan reduciendo los costos de producción y mejorando la eficiencia de los paneles solares, lo que los hace más accesibles y atractivos para un uso doméstico.

En el ámbito doméstico, la integración de sistemas solares con bombas de calor para la producción de agua caliente se presenta como una solución prometedora para reducir el consumo de energía no renovable. Las bombas de calor utilizan una cantidad mínima de electricidad para transferir calor, lo que las convierte en una opción eficiente para el calentamiento de agua. Al combinar estos sistemas con energía solar fotovoltaica, se puede maximizar el uso de energía renovable, reduciendo significativamente las emisiones de CO₂ y los costos de energía a largo plazo. Sin embargo, la implementación efectiva de estos sistemas requiere una planificación cuidadosa y una comprensión de las necesidades energéticas específicas de cada hogar.

A medida que las tecnologías de bombas de calor asistidas por energía fotovoltaica se vuelven más sofisticadas, los estudios se centran en optimizar su eficiencia y coste-efectividad. Los investigadores exploran diferentes configuraciones y métodos de control para maximizar el rendimiento del sistema, teniendo en cuenta factores como la variabilidad del clima, la demanda energética diaria y la capacidad de almacenamiento de energía. Además, se investigan estrategias para mejorar el autoconsumo de la energía solar generada, minimizando así la dependencia de la red eléctrica y maximizando la sostenibilidad. Estos esfuerzos de investigación y desarrollo son cruciales para aumentar la adopción de estas tecnologías en el mercado residencial.

Por último, el éxito de la integración de bombas de calor fotovoltaicas en los hogares depende en gran medida de la educación del consumidor y de políticas de incentivos gubernamentales. Los usuarios deben estar informados sobre los beneficios potenciales y los ahorros a largo plazo que estos sistemas pueden ofrecer. Al mismo tiempo, los gobiernos pueden facilitar la transición hacia energías renovables mediante subsidios, incentivos fiscales y regulaciones que promuevan la instalación de tecnologías limpias. Esta combinación de esfuerzos de educación y apoyo político es esencial para superar las barreras iniciales de costo y adopción, y para fomentar un cambio más amplio hacia soluciones energéticas sostenibles en el hogar.

En primer lugar, el estudio propuesto por Knuutinen et al. (2021) tiene como objetivo explorar diferentes métodos de control para optimizar el uso de bombas de calor geotérmicas (GSHP) asistidas por energía solar fotovoltaica para calentar agua doméstica. Para ello, se emplean cuatro métodos de control, siendo uno de ellos la utilización de información del mercado Nord Pool Spot junto con pronósticos de producción fotovoltaica. Además, los investigadores implementan este método de control durante un período de tres años utilizando datos horarios, comparando los resultados con métodos tradicionales. Como resultado, encuentran que los ahorros anuales en costos pueden alcanzar hasta un 53%, a pesar de los errores en el pronóstico. En conclusión, los resultados demuestran que este método de control es efectivo para reducir costos en comparación con otros métodos, sin que las imprecisiones del pronóstico afecten significativamente su rendimiento.

Asimismo, la investigación detallada por Martorana et al. (2021) pretende evaluar el rendimiento energético de diferentes configuraciones de bombas de calor asistidas por energía solar para la producción de agua caliente en comunidades energéticas pequeñas. En este contexto, el estudio se realiza en el sur de Italia, analizando sistemas equipados con paneles fotovoltaicos y fotovoltaico-térmicos, así como colectores solares térmicos, para servir a micro comunidades. Asimismo, se utilizan indicadores de rendimiento para guiar el dimensionamiento adecuado de los sistemas y evaluar el ahorro de energía primaria. Como

conclusión, se determina que el consumo de energía de estos sistemas está influenciado por la demanda diaria de agua caliente. De hecho, los sistemas basados en fotovoltaica muestran mejores resultados en términos de consumo reducido de energía primaria no renovable, mientras que los colectores solares térmicos no ofrecen suficiente apoyo operativo diario durante el invierno.

Además, el estudio descrito expuesto por Aguilar et al. (2019), evalúa los beneficios ambientales y la viabilidad económica de un calentador de agua con bomba de calor compacta asistida por fotovoltaica. En cuanto a la metodología, se incluyen mediciones experimentales a lo largo de un año para analizar la eficiencia del sistema en un hogar con cuatro miembros. Se prioriza el suministro de energía desde los paneles solares sobre la red eléctrica. Por consiguiente, los resultados muestran que el sistema reduce significativamente las emisiones de CO₂ en un 82% y el consumo de energía primaria no renovable en un 79% en comparación con un calentador convencional. Finalmente, la evaluación económica demuestra que el costo anualizado total del sistema es de 337 €/año, lo que lo hace competitivo frente a otros sistemas de calefacción como las calderas.

Por otro lado, Zhou et al., (2023) proponen un estudio que tiene como objetivo evaluar un sistema de bomba de calor térmica fotovoltaica (PVT) para la generación de energía y agua caliente doméstica. Se lleva a cabo un experimento continuo en Dalian, China, durante las estaciones de transición y el invierno, analizando el rendimiento de calefacción y generación de energía del sistema. Para esto, los métodos incluyen la construcción de una instalación de prueba y análisis teóricos del rendimiento. Los resultados experimentales muestran que el sistema propuesto genera electricidad y calor con alta eficiencia, logrando un COP promedio de calefacción de 5 durante la estación de transición y 4.4 en invierno. En consecuencia, este sistema demuestra un rendimiento estable a largo plazo, siendo capaz de generar electricidad y calor incluso en condiciones climáticas frías.

Por su parte, Beccali et al. (2019) evalúan opciones de almacenamiento de energía para calentadores de agua con bomba de calor acoplados a plantas fotovoltaicas para la producción de agua caliente doméstica. Para alcanzar este objetivo, se seleccionan dos bombas de calor de diferentes tamaños y se implementan estrategias de control inteligente para monitorear la temperatura del agua en el tanque. El estudio se basa en perfiles de consumo de agua de un usuario representativo en una isla mediterránea. Por consiguiente, los resultados indican que la combinación de estrategias de control inteligente y sistemas de baterías es la solución más adecuada para satisfacer la demanda energética de agua caliente utilizando fuentes renovables, manteniendo el confort del usuario.

También, Vaishak & Bhale (2019) evalúan el estado actual y las perspectivas futuras de los sistemas de bombas de calor asistidos por energía solar fotovoltaica/térmica. Se lleva a cabo un análisis crítico de la literatura existente para identificar el rendimiento y la eficiencia de estos sistemas en comparación con otras tecnologías de calefacción. La metodología incluye un análisis del diseño y desarrollo de un sistema fotovoltaico/térmico asistido por bomba de calor. Los resultados destacan que estos sistemas cogeneran calor y electricidad de manera eficiente, siendo más confiables y eficientes energéticamente que las tecnologías tradicionales.

Por otra parte, Clift & Suehrcke (2021) buscan optimizar el control de calentadores de agua con almacenamiento eléctrico alimentados por energía fotovoltaica para mejorar su eficiencia. En este sentido, se analizan los sistemas domésticos de PV en combinación con calentadores de agua, utilizando tanques de almacenamiento como baterías térmicas de bajo costo. Se utiliza un sistema PV de 3.6 kWp instalado en una casa con un calentador de agua de almacenamiento de 315 L. Los resultados muestran que, sin un control adecuado, el poder excedente de PV solo reduce el consumo de energía de la red en un 13%. Sin embargo, con un control optimizado, se pueden lograr ahorros de hasta un 90%, lo que también reduce la necesidad de exportar electricidad a la red.

En relación con lo anterior, Öztürk et al. (2021) realizan un análisis energético, exergético y económico (3E) de un sistema de calefacción de agua doméstico asistido por un colector fotovoltaico/térmico en diferentes regiones climáticas de Turquía. El estudio utiliza un modelo simulado en TRNSYS basado en datos meteorológicos reales. Además, se evalúan dos regiones climáticas, Hakkari y Trabzon, comparando el sistema con métodos tradicionales de calefacción de agua. Los resultados revelan que, a pesar de las condiciones climáticas frías, el sistema estudiado es más económico y eficiente en Hakkari, aunque no lo es en Trabzon. Esto resalta la importancia de considerar el clima regional en la viabilidad económica de estos sistemas.

Asimismo, James et al. (2021) se centra en la operación eficiente de colectores solares fotovoltaico-térmicos (PV-T) integrados con calentadores de agua de bomba de calor para aplicaciones domésticas. Se diseña y prueba un sistema con refrigerante R-32, que es amigable con el medio ambiente debido a su bajo potencial de calentamiento global. La metodología incluye pruebas de rendimiento para la producción de agua caliente, alcanzando una eficiencia de COP promedio de 6.3. En consecuencia, el sistema demuestra ser adecuado para aplicaciones domésticas, ofreciendo beneficios económicos con un periodo de recuperación de 2.5 años. Los resultados indican un impacto ambiental reducido en comparación con los sistemas convencionales.

Además, Besagni et al. (2019) evalúan un sistema de bomba de calor multifuncional asistida por energía solar, instalado en una casa en Milán. El sistema combina paneles híbridos fotovoltaico/térmicos con una bomba de calor reversible de fuente dual. Se realizan pruebas experimentales para analizar la eficiencia del sistema en diferentes estaciones. Los métodos incluyen el uso de evaporadores de “fuente de agua” y “fuente de aire” para optimizar el rendimiento. Los resultados muestran que el sistema mantiene altas eficiencias estacionales y utiliza efectivamente la energía solar para apoyar la producción de agua caliente doméstica, evitando ciclos de descongelación y mejorando el rendimiento general.

Por su parte, Dragsted et al. (2021) demuestran el rendimiento de un sistema de bomba de calor fotovoltaico-térmico (PVT) doméstico en diferentes climas. Para lograrlo, se crea y valida un modelo TRNSYS basado en datos experimentales de un sistema instalado en Dinamarca. La investigación incluye un análisis de sensibilidad sobre el área del colector para optimizar el rendimiento y la economía. Así, se analizan tres sistemas en diferentes ubicaciones: Dinamarca, Austria y Grecia. Por tanto, los resultados indican que la integración del sistema PVT ofrece un mejor rendimiento y viabilidad económica, adaptándose a las necesidades de calefacción específicas del clima.

Por otro lado, el estudio propuesto por C. Liu et al. (2023) investiga la integración de sistemas fotovoltaico-térmicos (PV/T) con calefacción por suelo radiante hidrónico para mejorar la eficiencia energética. Se realizan experimentos bajo condiciones invernales típicas para probar el rendimiento del sistema. La metodología incluye el análisis del rendimiento de la bomba de calor y del sistema de calefacción bajo el suelo. Los resultados muestran que el sistema logra un COP promedio de 5.66 y mantiene temperaturas cómodas rápidamente. Este enfoque integrado demuestra ser eficiente y económicamente viable, mejorando el confort térmico y la eficiencia energética en aplicaciones de calefacción de edificios.

Asimismo, Aguilar, Crespí, et al. (2019) estudian la producción de agua caliente doméstica mediante una bomba de calor compacta alimentada por paneles fotovoltaicos y la red. Se realizan experimentos durante más de 240 días para desarrollar y validar un modelo computacional del sistema. El modelo se implementa en MATLAB, permitiendo simulaciones a medio plazo y representaciones precisas de la estratificación dentro de los tanques de almacenamiento térmico. Finalmente, los resultados del modelo se utilizan para simular ciclos de uso de agua caliente doméstica, destacando la eficiencia del sistema en climas europeos y su capacidad de adaptación a diferentes demandas.

Por su parte, el estudio detallado por Mahdi & Gaddoa (2020) se centra en optimizar un sistema de bombeo solar fotovoltaico (PVSWPS) para calentadores solares de agua doméstica en el clima de Irak. Se evalúan tres configuraciones de arreglo fotovoltaico (4S, 2S

× 2P y 4P) para determinar la más eficiente en términos de energía suministrada a la bomba de agua. Los experimentos se realizan durante las horas de luz solar, mostrando que la configuración 2P × 2S proporciona la energía óptima.

Finalmente, Arenas-Larrañaga et al. (2023) analizan la integración de paneles fotovoltaicos y bombas de calor en sistemas domésticos, enfocándose en mejorar el autoconsumo y reducir costos. Utilizando un modelo probado en laboratorio, se realiza un análisis paramétrico considerando el clima, el tamaño de la instalación fotovoltaica y el aislamiento térmico del edificio. Los resultados muestran que el autoconsumo promedio mejora en un 13% y los costos se reducen en un 2.5%. Se identifican estrategias de control para maximizar el rendimiento del sistema, destacando la importancia del tamaño adecuado de los sistemas PV y ASHP para aumentar la eficiencia.

2.2. Sistema de generación fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica se basa en la conversión directa de la luz solar en electricidad utilizando células fotovoltaicas. Estas células están compuestas de materiales semiconductores, como el silicio, que generan un flujo eléctrico cuando se exponen a la luz solar, un proceso conocido como el efecto fotovoltaico (Vaishak & Bhale, 2019). La eficiencia de una célula fotovoltaica se refiere a su capacidad para convertir la energía solar en electricidad. Los avances tecnológicos han mejorado significativamente la eficiencia de estas células, aunque la eficiencia varía según el tipo de tecnología fotovoltaica empleada (Choudhary & Srivastava, 2019).

Existen diferentes configuraciones de sistemas fotovoltaicos, incluyendo sistemas conectados a la red (ver Figura 1) y autónomos. Este último es crucial en áreas sin acceso a la red eléctrica o si se desea independizar de la red (Haegel et al., 2019).

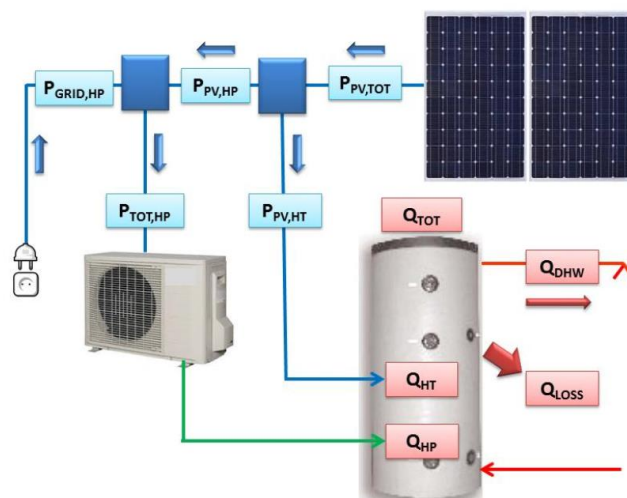


Figura 1. Sistema fotovoltaico con conexión a la red eléctrica

Fuente: (Haegel et al., 2019)

El rendimiento de un sistema fotovoltaico es influenciado por una serie de factores críticos (Wilson et al., 2020). Estos incluyen:

- **Ubicación geográfica:** la latitud y las características específicas del emplazamiento determinan la cantidad de radiación solar recibida, lo cual es un factor primordial en la producción de energía fotovoltaica. Además, la orientación óptima de los paneles hacia el sol y el ángulo de inclinación adecuado maximizan la captación de la luz solar, visto en la Figura 2. Estos parámetros varían según la ubicación geográfica y deben ser ajustados para obtener la máxima eficiencia.

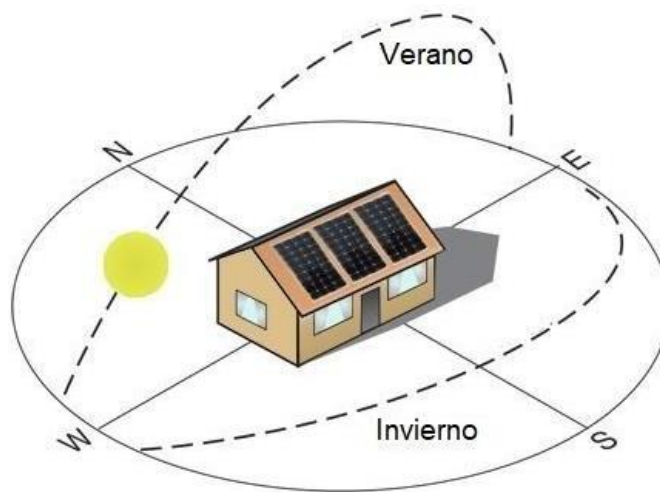


Figura 2. Ubicación geográfica para producción solar.

Fuente: (Wilson et al., 2020)

- **Condiciones climáticas:** factores como la nubosidad (ver Figura 3), la humedad y la temperatura ambiental pueden afectar la eficiencia de los paneles solares. Por ejemplo, temperaturas extremadamente altas pueden reducir la eficiencia de conversión de los paneles.



Figura 3. Condiciones climáticas que afectan a los paneles solares.

Fuente: (Wilson et al., 2020)

- Las sombras proyectadas por edificios, árboles u otros obstáculos pueden reducir significativamente la producción de energía de un panel fotovoltaico, incluso si la sombra cubre solo una parte del panel.

Los sistemas fotovoltaicos, conocidos por su versatilidad, se adaptan a una diversidad de aplicaciones que abarcan desde instalaciones residenciales de pequeña escala hasta complejas y extensas plantas de energía solar. Esta flexibilidad los convierte en una solución energética viable tanto para uso doméstico como para grandes proyectos industriales o comerciales. Además, su naturaleza como fuente de energía limpia y renovable les otorga un papel crucial en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo significativamente a la lucha contra el cambio climático. Al generar electricidad sin la combustión de combustibles fósiles, los sistemas fotovoltaicos reducen la dependencia de estas fuentes no renovables y disminuyen el impacto ambiental asociado con la generación de energía tradicional.

2.2.1. El sol y su radiación

Como la única estrella del sistema solar, el sol es la fuente primordial de energía para todos los planetas que orbitan a su alrededor. Consiste en una esfera ardiente de gases, compuesta principalmente por hidrógeno y helio, aunque también contiene una mezcla de oxígeno, carbono, nitrógeno, hierro, entre otros, sumando un total de 67 elementos. En su núcleo, las fuerzas gravitacionales generan una temperatura y presión extremadamente altas. La temperatura en el núcleo del Sol alcanza casi 27 millones de °F (15 millones de °C). Durante este proceso, los átomos de hidrógeno se fusionan para formar átomos de helio mediante la fusión nuclear. Esta reacción ocurre de manera continua dentro del Sol, liberando una enorme cantidad de energía que se irradia hacia el exterior. Debido a su intenso calor, los átomos gaseosos se ionizan, formando un plasma. La radiación solar se compone principalmente de energías magnéticas, térmicas y lumínicas (W. Liu, 2023).

2.2.2. Espectro de radiación

La radiación solar se compone de energías de calor, luz visible y radiación ultravioleta (UV). El espectro solar se distribuye de la siguiente manera: un 6.6% corresponde a rayos UV (con una longitud de onda inferior a 380 nm), un 44.7% a luz visible (380–780 nm), y un 48.7% a radiación infrarroja (IR), cuya longitud de onda es mayor a 780 nm y representa esencialmente energía térmica. La Figura 4 muestra el espectro de la radiación solar.

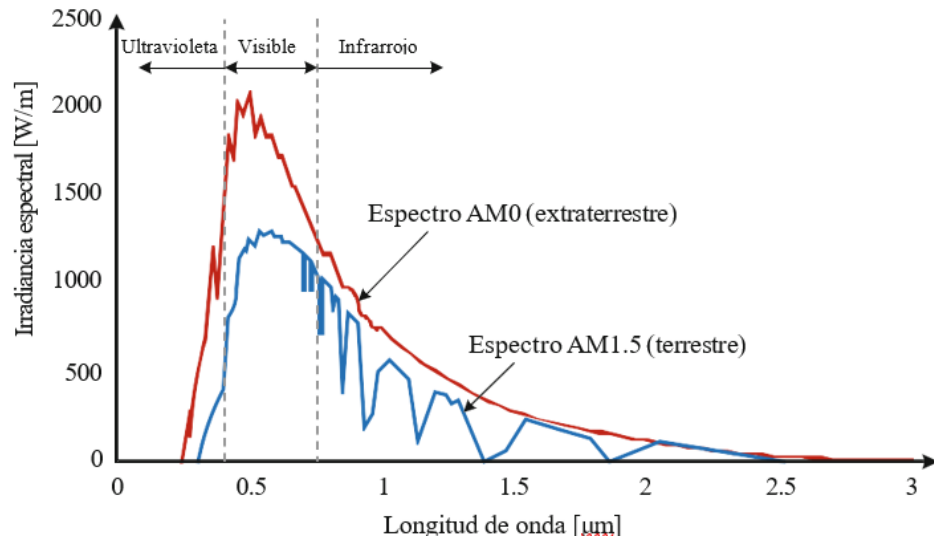


Figura 4. Espectro solar de radiación.

Fuente: (H. Wu et al., 2023)

La Figura 4 ilustra la irradiancia espectral de cada longitud de onda en el espectro solar. El espectro se analiza en relación con el índice de masa de aire (AM), un concepto que se aborda más adelante en este capítulo. La curva roja representa el espectro AM0, que corresponde a la radiación extraterrestre que llega a la parte exterior de la atmósfera terrestre desde el Sol. Por otro lado, la línea azul muestra el espectro AM1.5, que es la radiación solar que alcanza la superficie terrestre. El espectro AM1.5 es más bajo que el AM0 debido a las pérdidas de radiación solar causadas por la atmósfera.

2.2.3. Recurso solar

La irradiancia horizontal global (GHI), que mide la radiación solar total que incide sobre una superficie horizontal en la Tierra, se compone de tres componentes: irradiancia directa normal (DNI), irradiancia difusa horizontal (DHI) y la radiación reflejada por el suelo (Xiao et al., 2023).

Dado que los paneles solares se instalan con cierta inclinación, la GHI se utiliza para calcular la irradiancia sobre superficies inclinadas, lo cual es fundamental para determinar el ángulo óptimo de instalación que maximice la generación de energía eléctrica en corriente continua (Xue et al., 2023).

La DNI es un elemento crucial en la tecnología solar de concentración, ya que mide la cantidad de radiación directa que incide sobre una superficie orientada hacia el Sol. La relación entre GHI, DHI y DNI se expresa mediante la siguiente ecuación, en función del ángulo cenital z (S. Hao et al., 2023).

$$GHI = DHI + DNI * \cos(z) \quad (1)$$

La radiación reflejada por el suelo también es relevante, y se mide mediante el albedo, que es la proporción de radiación solar reflejada por una superficie. El albedo varía entre 0 (superficies que absorben toda la radiación) y 1 (superficies que la reflejan por completo), dependiendo de factores como la ubicación, la estación y la hora del día (Li et al., 2023).

La irradiancia inclinada global (GTI) mide la radiación solar que incide sobre una superficie inclinada en un ángulo específico de inclinación y acimut. Al igual que la GHI, la GTI se expresa en kWh/m² por período de tiempo y considera la radiación directa, difusa y reflejada por el suelo (Li et al., 2023).

La Figura 5 muestra cómo los rayos solares interactúan con la Tierra: algunos inciden directamente en los paneles solares, otros se reflejan en el suelo y algunos se dispersan por las nubes. Las nubes también absorben una parte significativa de la radiación solar (Tan et al., 2022).

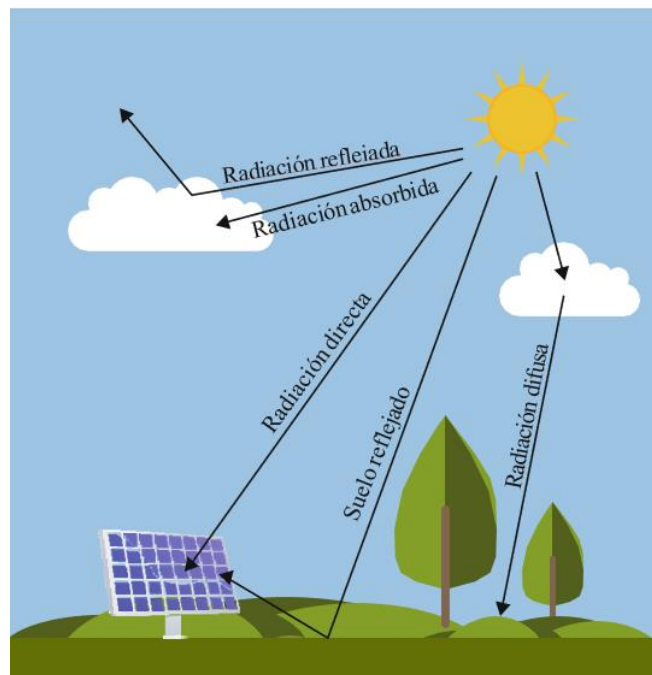


Figura 5. Interacción de la radiación.

Fuente: (Gafar, 2019)

2.2.4. Horas pico de sol

Las horas pico de sol (PSH) se refieren al tiempo en que la irradiancia horizontal global (GHI) promedio es de 1000 W/m² en un día. El valor máximo de irradiancia solar ocurre al mediodía, aunque puede variar durante el resto del día. La Figura 9 muestra el concepto de PSH en un gráfico de irradiancia solar a lo largo de un día, donde el valor de PSH en el ejemplo es de 6 kWh/m² por día, lo que indica que durante seis horas la irradiancia promedio fue de 1000 W/m² (Sward et al., 2019).

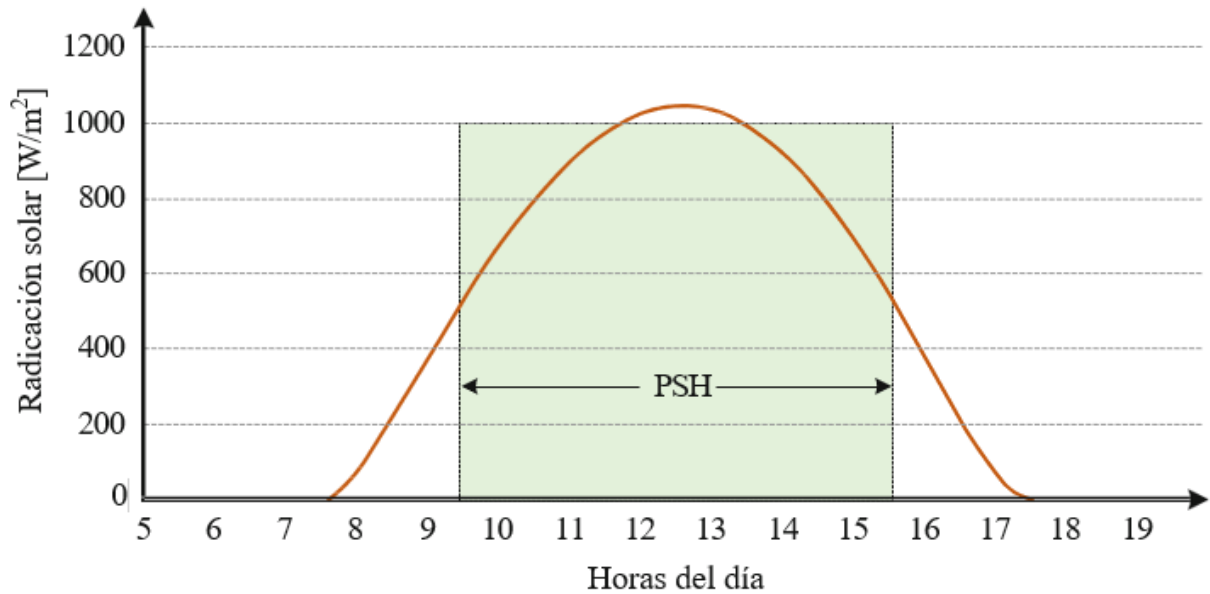


Figura 6. Variación de la irradiancia solar a lo largo del día.

Fuente: (Sward et al., 2019)

El PSH varía según la ubicación y cambia diariamente. Para obtener un valor promedio de PSH en un lugar específico, se calcula el promedio mensual, utilizando la siguiente ecuación (Megantoro et al., 2022).

$$PSH = \frac{\text{promedio de GHI de un mes}}{\text{número de días en el mes}} \quad (2)$$

2.3. Bomba de calor

Una bomba de calor es un dispositivo que utiliza energía para transferir calor de una fuente fría a una fuente caliente, invirtiendo el flujo natural del calor que normalmente va de un lugar caliente a un lugar frío. Este principio de operación es fundamentalmente el mismo que el utilizado en los refrigeradores y los acondicionadores de aire, pero aplicado en sentido inverso para el propósito de calefacción. Las bombas de calor pueden extraer calor del aire, del agua o del suelo y transferirlo al agua que se desea calentar para uso doméstico o industrial (Longo et al., 2020).

El proceso de transferencia de calor se realiza mediante un ciclo de refrigeración inverso. En lugar de generar calor directamente como lo haría un calentador eléctrico o de combustión, una bomba de calor utiliza energía para mover el calor de una fuente a baja temperatura (fuente fría) a una fuente a mayor temperatura (fuente caliente), como se presenta en la Figura 7. Este método es significativamente más eficiente en términos energéticos porque el sistema puede producir más energía térmica que la energía eléctrica que consume para operar el ciclo de refrigeración (Cantor, 2020).

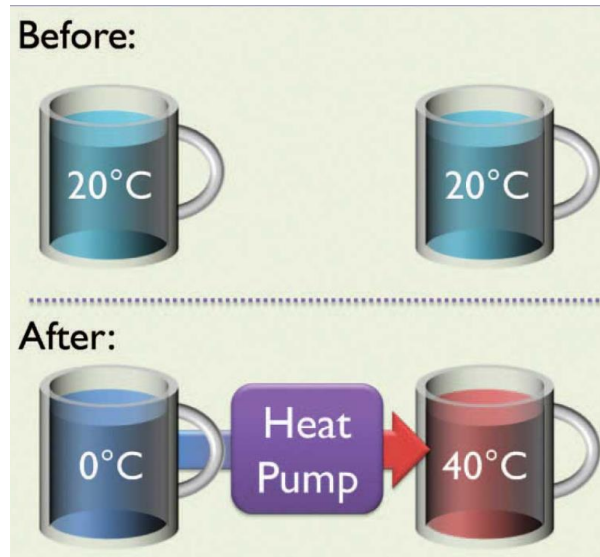


Figura 7. Proceso de transferencia de calor

Fuente: (Cantor, 2020)

2.3.1. Definición y funcionamiento de las bombas de calor

Las bombas de calor son equipos diseñados para transferir energía térmica de un lugar a otro, utilizando principios de la termodinámica para proporcionar calefacción o refrigeración. Este proceso implica extraer calor de una fuente de baja temperatura, como el aire, el agua o el suelo, y transferirlo a un ambiente de mayor temperatura. Para ello, se utiliza un ciclo cerrado en el que un fluido refrigerante circula, absorbiendo y liberando calor a través de la compresión y expansión en diferentes etapas del ciclo (Allen et al., 2023).

2.3.2. Tipos de bomba de calor

Las bombas de calor pueden clasificarse en distintos tipos según la fuente de calor que utilizan.

2.3.2.1. Bombas de calor aire-agua

Las bombas de calor aire-agua, como se presenta en la Figura 8, capturan calor del aire exterior y lo transfieren a un sistema de calefacción basado en agua. Son ampliamente utilizadas en hogares para calefacción y producción de agua caliente. Estas bombas funcionan de manera eficiente en climas moderados, pero su desempeño disminuye en temperaturas extremadamente frías. El sistema consta de un ventilador que dirige el aire hacia un intercambiador de calor, donde un refrigerante absorbe la energía térmica. Posteriormente, el calor es transferido a un circuito de agua que distribuye la energía térmica por el edificio. Este tipo de bomba es popular por su facilidad de instalación y menor costo inicial (Malić et al., 2020).

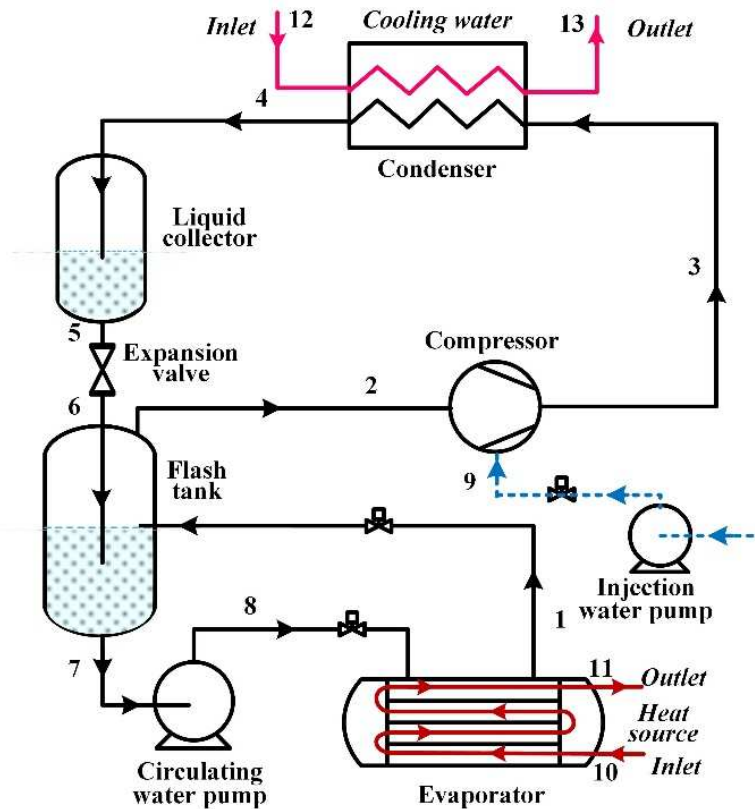


Figura 9. Proceso de transferencia de calor, bomba de calor agua-agua..

Fuente: (D. Wu et al., 2020)

2.3.2.3. Bombas de calor geotérmicas

Las bombas de calor geotérmicas extraen calor del subsuelo, como se observa en la Figura 10, donde las temperaturas se mantienen relativamente estables durante todo el año. Para ello, utilizan tuberías enterradas que circulan un fluido para absorber o liberar calor desde y hacia el suelo. Estas bombas son extremadamente eficientes debido a la estabilidad térmica del subsuelo, lo que las hace adecuadas tanto para climas fríos como cálidos. A pesar de que su instalación inicial es costosa, debido a la necesidad de perforaciones profundas o amplias, proporcionan importantes ahorros energéticos a largo plazo. Por esta razón, son una opción preferida para edificios con alta demanda energética continua, como hospitales o grandes centros comerciales (Habibi & Hakkaki-Fard, 2019).

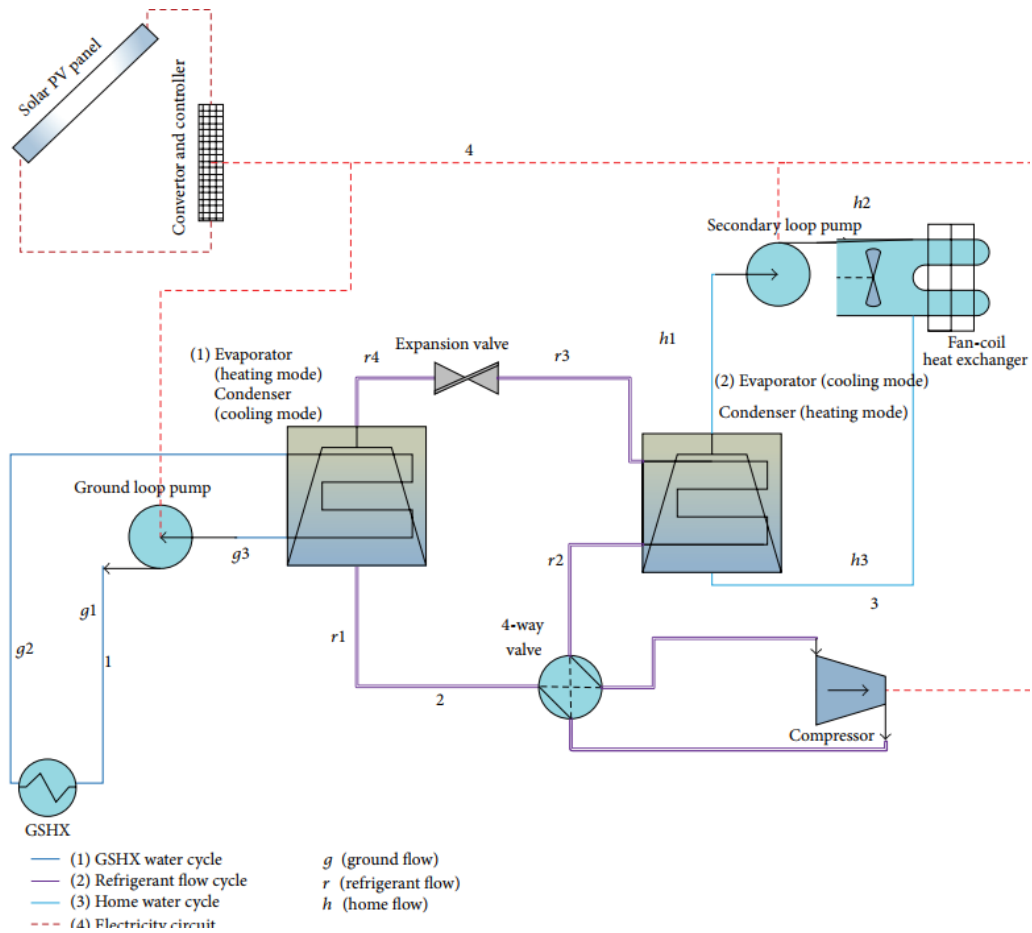


Figura 10. Proceso de transferencia de calor bomba geotérmica.

Fuente: (Habibi & Hakkaki-Fard, 2019)

2.3.3. Ciclo de refrigeración por compresión de vapor

El ciclo de compresión de vapor es el fundamento del funcionamiento de muchas bombas de calor. Este proceso consta de cuatro etapas principales: evaporación, compresión, condensación y expansión. Durante este ciclo, el fluido refrigerante absorbe calor en la evaporación, luego se comprime aumentando su temperatura y presión, se condensa liberando el calor, y finalmente se expande para comenzar nuevamente el ciclo (Ismael et al., 2022). Se pueden implementar mejoras, como la inyección de vapor y el uso de intercambiadores internos, para aumentar la eficiencia del sistema (Tello Oquendo, 2019).

2.3.4. Factores que influyen en el rendimiento de las bombas de calor

El rendimiento de las bombas de calor depende de varios factores, como se presenta en la Tabla 1, entre los que destacan:

Temperatura de la fuente: Una mayor diferencia entre la temperatura de la fuente de calor y el destino reduce la eficiencia de la bomba (Sun et al., 2022).

Tipo de refrigerante: La eficiencia y seguridad del refrigerante utilizado influyen significativamente en el coeficiente de rendimiento (COP) (Mateu-Royo et al., 2021).

Diseño del sistema: Mejoras tecnológicas, como la compresión en dos etapas o el uso de expansores, pueden optimizar el rendimiento (Biao et al., 2019).

Tabla 1. Factores clave en el rendimiento de la bomba de calor.

Factor	Impacto en el COP
Temperatura de fuente/sumidero	Diferencia mayor reduce la eficiencia
Tipo de refrigerante	Eficiencia depende de las características del refrigerante
Diseño del sistema	Mejora con la inyección de vapor y etapas múltiples

Fuente: (Biao et al., 2019)

2.3.5. Coeficiente de rendimiento (COP) y eficiencia estacional (SPF)

El COP es una medida clave de la eficiencia de una bomba de calor y se define como la relación entre el calor transferido y la energía consumida, como se expone en la ecuación 3. Un COP más alto indica una mayor eficiencia, que puede variar según el diseño del sistema y las condiciones operativas (J. Liu et al., 2021). Por otro lado, el factor de eficiencia estacional (SPF) evalúa el rendimiento de la bomba de calor durante toda una temporada, considerando las fluctuaciones en la demanda y el clima a lo largo del año (Gao et al., 2019).

$$COP = \frac{Q_{out}}{W_{in}} \quad (3)$$

En este sentido,

Q_{out} es el calor entregado.

W_{in} se refiere a la energía consumida.

2.4. Ciclo de compresión de vapor

Este es el método comúnmente utilizado en bombas de calor. Este ciclo implica cuatro etapas principales: evaporación, compresión, condensación y expansión (Cantor, 2020). A continuación, se detalla cada una de estas etapas:

1. **Evaporación:** En la etapa de evaporación, un refrigerante líquido de baja temperatura y presión fluye a través de un evaporador. El evaporador está en contacto con la fuente fría (por ejemplo, aire exterior, agua de un pozo o el suelo). A medida que el refrigerante absorbe calor de la fuente fría, se evapora y se convierte en gas. Este

proceso enfría la fuente fría al extraerle calor, y el refrigerante gaseoso se calienta como resultado de la absorción de energía térmica.

2. **Compresión:** El gas refrigerante de baja presión y alta temperatura resultante de la evaporación se dirige a un compresor. El compresor, impulsado por un motor eléctrico, aumenta la presión del gas refrigerante, lo que también incrementa su temperatura. Este gas refrigerante ahora está a una temperatura y presión mucho más altas que antes.
3. **Condensación:** El refrigerante gaseoso de alta presión y temperatura entra en un condensador. En esta etapa, el refrigerante libera su calor al medio que se desea calentar (por ejemplo, agua en un sistema de calefacción). Al liberar calor, el refrigerante se condensa, pasando de gas a líquido. Este proceso de liberación de calor eleva la temperatura del medio calentado (el agua en este caso).
4. **Expansión:** El refrigerante líquido de alta presión se mueve a través de una válvula de expansión, donde su presión disminuye abruptamente. Esta reducción de presión enfría el refrigerante, preparándolo para regresar al evaporador y comenzar el ciclo nuevamente. El refrigerante, ahora a baja presión y temperatura, está listo para absorber más calor de la fuente fría, reiniciando el ciclo.

2.5. Eficiencia de ciclo de compresión de vapor

El coeficiente de rendimiento (COP) es una medida clave de la eficiencia de una bomba de calor. El COP es la relación entre la cantidad de calor entregada a la fuente caliente y la energía eléctrica consumida por el compresor. Un COP de 3, por ejemplo, indica que, por cada unidad de energía eléctrica utilizada, se entregan tres unidades de energía térmica. La eficiencia del ciclo de compresión de vapor puede verse influenciada por varios factores, incluyendo la temperatura de la fuente fría y la temperatura del medio que se está calentando. Generalmente, una menor diferencia de temperatura entre la fuente fría y la fuente caliente resulta en un COP más alto (Rony et al., 2019).

Las bombas de calor son particularmente efectivas en climas moderados, donde las temperaturas extremas son menos frecuentes. Sin embargo, los avances tecnológicos han mejorado significativamente el rendimiento de las bombas de calor en condiciones de frío extremo, haciendo que esta tecnología sea viable en una gama más amplia de entornos (Zhu et al., 2021).

2.6. Beneficios y aplicaciones

Las bombas de calor son altamente eficientes y pueden reducir significativamente los costos de calefacción y las emisiones de carbono en comparación con los sistemas de

calefacción tradicionales. Son adecuadas para una variedad de aplicaciones, desde la calefacción residencial y comercial hasta el calentamiento de agua en instalaciones industriales. Además, cuando se combinan con sistemas de energía fotovoltaica, las bombas de calor pueden operar con electricidad generada a partir de fuentes renovables, lo que las convierte en una opción aún más sostenible y económica a largo plazo.

En consecuencia, el ciclo de compresión de vapor es la piedra angular del funcionamiento de las bombas de calor, permitiendo una transferencia de calor eficiente desde una fuente fría a una fuente caliente. La comprensión de este ciclo y de cómo se integra con sistemas de energía renovable es fundamental para maximizar la eficiencia y los beneficios ambientales de las bombas de calor (Maslikova et al., 2023).

CAPÍTULO 3

3. ENFOQUE MATEMÁTICO PARA LA MODELACIÓN

Para abordar el dimensionamiento del sistema de calentamiento de agua sanitaria, se requiere una formulación matemática cuidadosa que abarque cada componente clave. El proceso comienza con un análisis detallado de la zona en estudio, seguido por la evaluación del consumo eléctrico y de agua, datos esenciales para entender la demanda energética. A partir de esta información sobre el uso de agua caliente, se dimensiona inicialmente la bomba de calor, lo que permite posteriormente definir las características del sistema fotovoltaico que abastecerá al sistema de calentamiento de manera autónoma y eficiente.

3.1. Entorno analizado

Este análisis explora la eficiencia energética al evaluar el rendimiento de un sistema de bomba de calor que utiliza energía solar fotovoltaica para calentar agua. La investigación se lleva a cabo en un edificio residencial situado en la intersección de las calles Carchi y Tungurahua (ver Figura 12), en la casa N.º 41 de Cuenca (ver Figura 11), en la provincia de Azuay, Ecuador. Este inmueble alberga cinco departamentos habitados, los cuales aportan datos valiosos sobre el consumo energético, fundamentales para el desarrollo del estudio. Gracias a este contexto real, es posible analizar tanto el consumo como las ventajas energéticas del sistema de bomba de calor fotovoltaico en comparación con métodos convencionales, brindando una visión detallada de su efectividad en condiciones de uso cotidiano.



Figura 11. Edificación seleccionada para el estudio.

Fuente: Autor

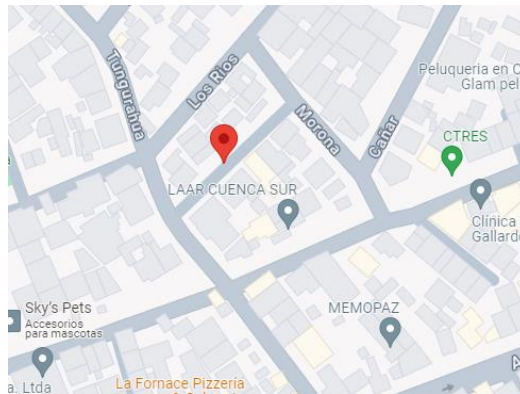


Figura 12. Ubicación del edificio de estudio.

Fuente: Google maps

3.2. Evaluación del uso energético en el edificio

El análisis del consumo energético en las cinco viviendas revela una marcada diversidad en la demanda de electricidad, de acuerdo con lo representado en la Figura 13. La vivienda 3 destaca con el mayor uso, alcanzando los 83 kWh, seguida de la vivienda 4 con 78 kWh; esto implica una posible ocupación mayor o un uso intensivo de electrodomésticos en ambos hogares. En el otro extremo, la vivienda 1 muestra el consumo más bajo, con apenas 30 kWh, lo que podría reflejar un menor número de habitantes o una gestión más eficiente del uso de energía.

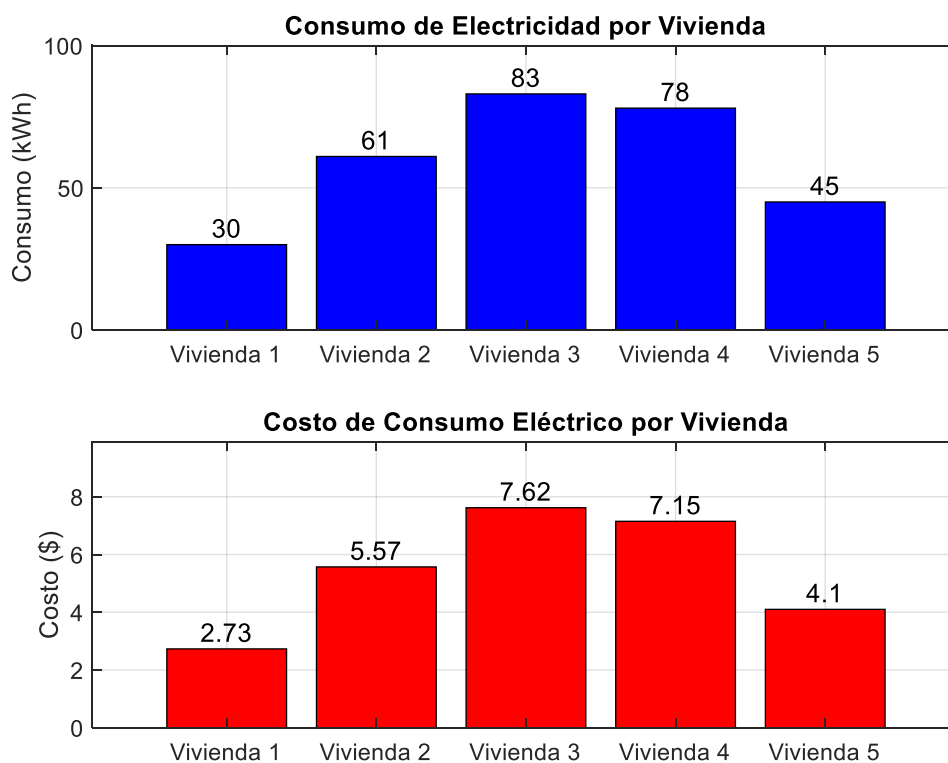


Figura 13. Exploración del gasto energético mensual.

Fuente: Autor

Respecto a los costos, se evidencia una relación proporcional con el consumo. La vivienda 3 incurre en el gasto más alto de \$7.62, mientras que la vivienda 4 le sigue de cerca con \$7.15. Las viviendas 1 y 5, que presentan menores consumos, también registran los costos más bajos, \$2.73 y \$4.1 respectivamente. Estos resultados ponen de manifiesto cómo los distintos niveles de uso de electricidad influyen directamente en los costos, y describen patrones de consumo que podrían estar asociados con factores como el tamaño de la familia o prácticas de eficiencia energética en cada vivienda.

3.3. Análisis de consumo de agua caliente en el caso de estudio

Para determinar el consumo de Agua Caliente Sanitaria (ACS) se utilizan encuestas realizadas a cinco residentes. El edificio se ubica en Cuenca, Ecuador. Los datos fueron recopilados mediante Google Forms. La información obtenida incluye frecuencia de uso, duración de cada sesión y volumen de agua empleado. El análisis busca calcular con precisión el consumo total de ACS.

3.3.1. Pregunta 1: Número de personas en la vivienda

El análisis de la ocupación por vivienda se basa en cinco encuestas, presentadas en la Figura 14. Los resultados indican que el 60% de las viviendas tienen dos residentes. El 40% restante alberga a una sola persona. No se identificaron viviendas con tres o más ocupantes. Esta tendencia revela una baja densidad de ocupación en los hogares. Dicho factor influye directamente en la estimación del consumo de agua caliente sanitaria (ACS). Un menor número de habitantes suele asociarse con una menor demanda diaria de ACS.

1. Número de personas en la vivienda:
5 responses

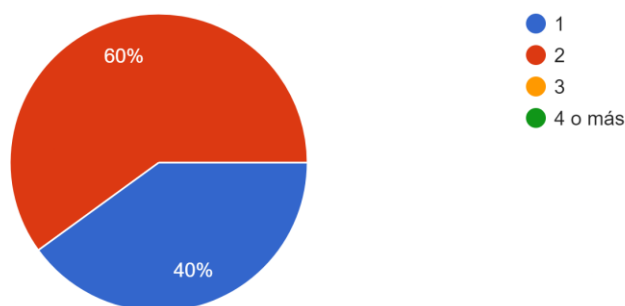


Figura 14. Número de personas en la vivienda de estudio

Fuente: Autor

3.3.2. Pregunta 2: Tipo de vivienda

La Figura 15 indica que todos los encuestados residen en departamentos. Esta uniformidad en el tipo de vivienda permite comparar con mayor precisión el consumo de agua caliente sanitaria (ACS). La similitud en las estructuras residenciales facilita un análisis más controlado. Los resultados reflejan un entorno multifamiliar. En este contexto, los patrones de consumo varían según factores como el tamaño del departamento y la existencia de instalaciones compartidas.

2. Tipo de vivienda:
5 respuestas



Figura 15. Tipo de vivienda

Fuente: Autor

3.3.3. Pregunta 3: Ubicación en el edificio

La Figura 16 muestra la ubicación de los encuestados en el edificio. Un 40% vive en niveles intermedios. Otro 40% habita en el último piso. El 20% restante reside en la planta baja. Esta variación de altura influye en el consumo de agua caliente sanitaria (ACS). La presión del agua y los tiempos de entrega pueden verse afectados. Además, las pérdidas térmicas en las tuberías son más notorias en sistemas centralizados.

3. Ubicación en el edificio:
5 respuestas

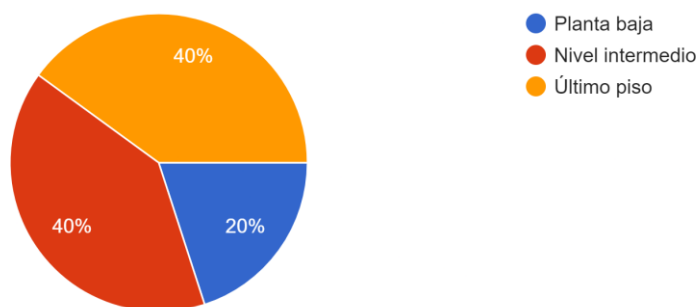


Figura 16. Ubicación en el edificio de las personas

Fuente: Autor

3.3.4. Pregunta 4: ¿Qué tipo de medio de calentamiento de agua utiliza en su hogar?

La Figura 17 indica que el 80 % de los encuestados utiliza la ducha eléctrica para el calentamiento de agua, mientras que el 20 % emplea el calefón a gas. No se reporta el uso de sistemas alternativos, como bombas de calor, sistemas solares térmicos o calefones eléctricos. El predominio de la ducha eléctrica implica un consumo energético elevado, debido a su alta demanda de potencia instantánea, así como, su eficiencia moderada. Por el contrario, el uso minoritario del calefón a gas refleja una menor dependencia de la energía eléctrica en dichos hogares.

4. ¿Qué tipo de medio de calentamiento de agua utiliza en su hogar?
5 respuestas

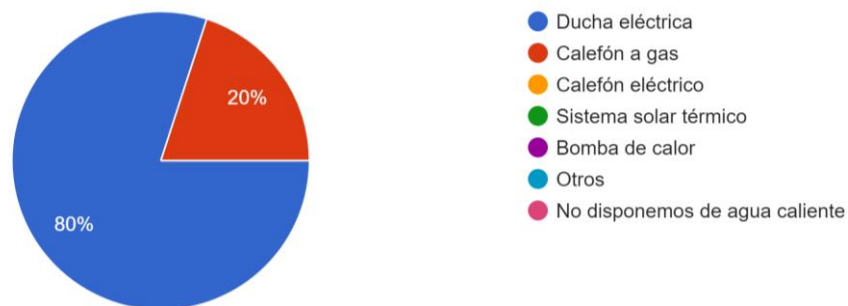


Figura 17. Medios de calentamiento de agua usados en el hogar.

Fuente: Autor

3.3.5. Pregunta 5: ¿En qué horarios utiliza agua caliente?

La Figura 18 indica que el horario de mayor uso de agua caliente sanitaria (ACS) es entre las 12:00 a. m. y las 6:00 a. m., con un 80 % de los encuestados. El segundo periodo de mayor frecuencia ocurre entre las 6:00 p. m. y las 9:00 p. m., con un 40 % de uso.

5. ¿En qué horarios utiliza agua caliente? (Seleccione todos los que correspondan):
5 respuestas

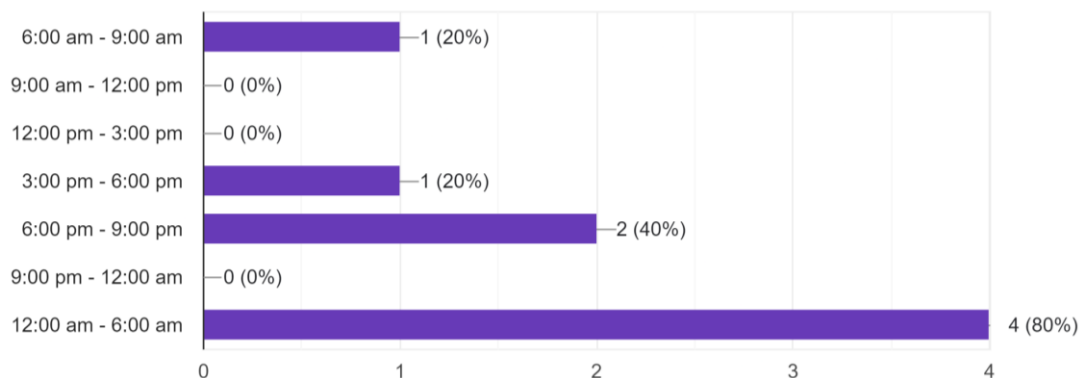


Figura 18. Horario de consumo de ACS.

Fuente: Autor

Los intervalos de 6:00 a. m. a 9:00 a. m. y de 3:00 p. m. a 6:00 p. m. registran un 20 % cada uno. No se reporta consumo entre las 9:00 a. m. y las 3:00 p. m., ni entre las 9:00 p. m. y las 12:00 a. m. El patrón muestra un consumo concentrado en horas vespertinas.

3.3.6. Pregunta 6: ¿Cuánto tiempo suele durar cada ducha?

La Figura 19 expresa que el 60 % de los encuestados toma duchas con una duración de 10 a 15 minutos. Un 20 % se encuentra en el rango de 5 a 10 minutos, mientras que otro 20 % toma duchas de menos de 5 minutos. Además, no se reportaron duchas con una duración superior a 15 minutos.

Este patrón indica que la mayoría de los usuarios mantiene un tiempo de ducha moderado, lo que influye directamente en el volumen de agua caliente sanitaria (ACS) consumido. Considerando un caudal típico de 8 a 10 litros por minuto, las duchas de 10 a 15 minutos representarían un consumo aproximado de 80 a 150 litros por evento. Este consumo constituye la principal contribución al uso de ACS en el edificio.

6. ¿Cuánto tiempo suele durar cada ducha (aproximadamente)?
5 responses

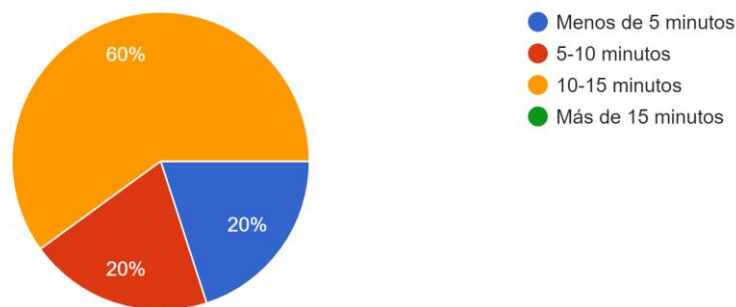


Figura 19. Tiempo de duración de duchas.

Fuente: Autor

3.3.7. Pregunta 7: Número promedio de duchas diarias por persona en su hogar

La Figura 20 expresa que el 100 % de los encuestados toma, en promedio, una ducha diaria por persona. Este hábito refleja un patrón de consumo de agua caliente sanitaria (ACS) constante y predecible, lo que facilita la estimación del volumen total utilizado diariamente.

7. Número promedio de duchas diarias por persona en su hogar:
5 responses

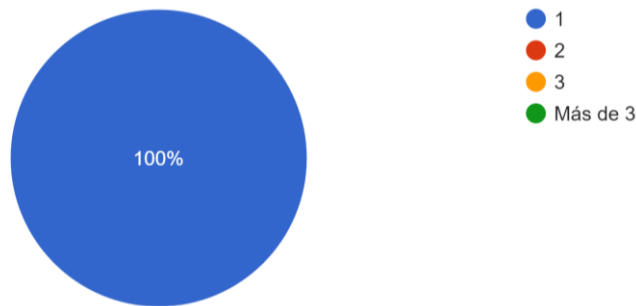


Figura 20. Número de duchas por persona.

Fuente: Autor

3.3.8. Pregunta 8: ¿Utiliza agua caliente para otros fines?

La Figura 21 muestra que el 80 % de los encuestados utiliza agua caliente para fines no especificados, mientras que el 20 % la emplea para el lavado de platos. No se reporta su uso en el lavado de manos ni de ropa.

El uso de ACS fuera de las duchas es limitado, concentrándose principalmente en el lavado de platos. El elevado porcentaje en la categoría "otros", por la característica de la encuesta, incluyen actividades como limpieza general y preparación de alimentos.

8. ¿Utiliza agua caliente para otros fines?
5 responses

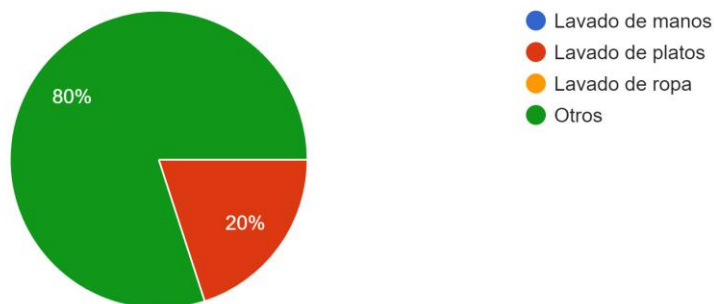


Figura 21. ACS para otros fines.

Fuente: Autor

3.3.9. Pregunta 9: Para las duchas, ¿En qué horarios suelen realizarse?

El consumo de ACS varía a lo largo del día, como se observa en la Figura 22, concentrándose principalmente en las mañanas y noches tardías. Los periodos entre las 9:00 a. m. y las 3:00 p. m., así como entre las 9:00 p. m. y las 6:00 a. m., reflejan una actividad moderada.

9. Para las duchas, ¿en qué horarios suelen realizarse? (Seleccione todos los que correspondan):

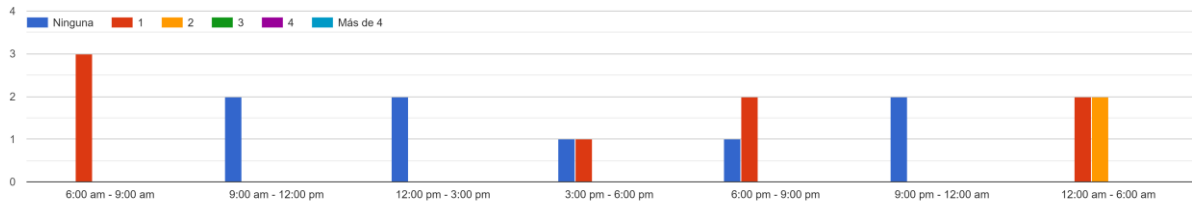


Figura 22. Horarios de uso de la ACS.

Fuente: Autor

Esta distribución indica una demanda de ACS más elevada en los extremos del día, lo que podría influir en la planificación del almacenamiento o en el dimensionamiento del sistema de generación de agua caliente.

3.3.10. Pregunta 10: Para otras actividades (lavado de platos, manos, ropa), indique el horario típico de uso de agua caliente

La Figura 23 expone que el uso de ACS para el lavado de platos sucede en su mayoría durante la noche (3 encuestados). Las actividades clasificadas como "otros usos" también se concentran en horario nocturno (3 encuestados) y, de forma mínima, en la mañana (1 encuestado). Además, no se reporta uso de ACS para estas actividades durante la tarde.

10. Para otras actividades (lavado de platos, manos, ropa), indique el horario típico de uso de agua caliente:

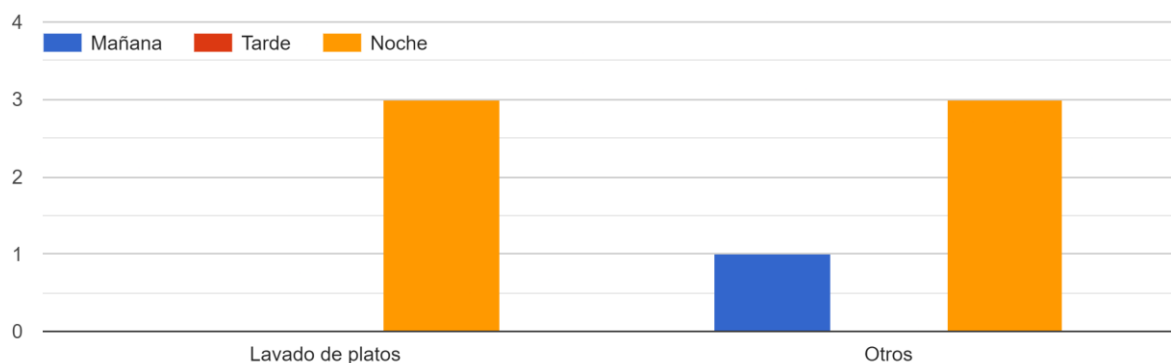


Figura 23. Horarios principales de uso de la ACS.

Fuente: Autor

El consumo de ACS para fines distintos a la ducha se concentra mayoritariamente en horas nocturnas. Este patrón implica un uso asociado a actividades posteriores a la cena y previas al descanso nocturno. La baja frecuencia en la mañana y la ausencia de consumo

durante la tarde indican un menor impacto en la demanda total diaria en comparación con el uso de duchas.

3.4. Evaluación del consumo de agua en la edificación

En el área de estudio, como se presenta en la Figura 24, el consumo de agua alcanza un pico a las 5:00. En ese momento, el uso total llega a 504.7 litros, mientras que el consumo ACS alcanza 353.33 litros. Este comportamiento se concentra en la mañana debido a las rutinas domésticas. Por el contrario, durante el resto del día, tanto el consumo total como el de ACS son mínimos y cercanos a cero. No obstante, a partir de las 15 horas existe un aumento leve hasta las 21 horas. Esto demuestra un patrón de uso limitado y predecible, característico de entornos residenciales.

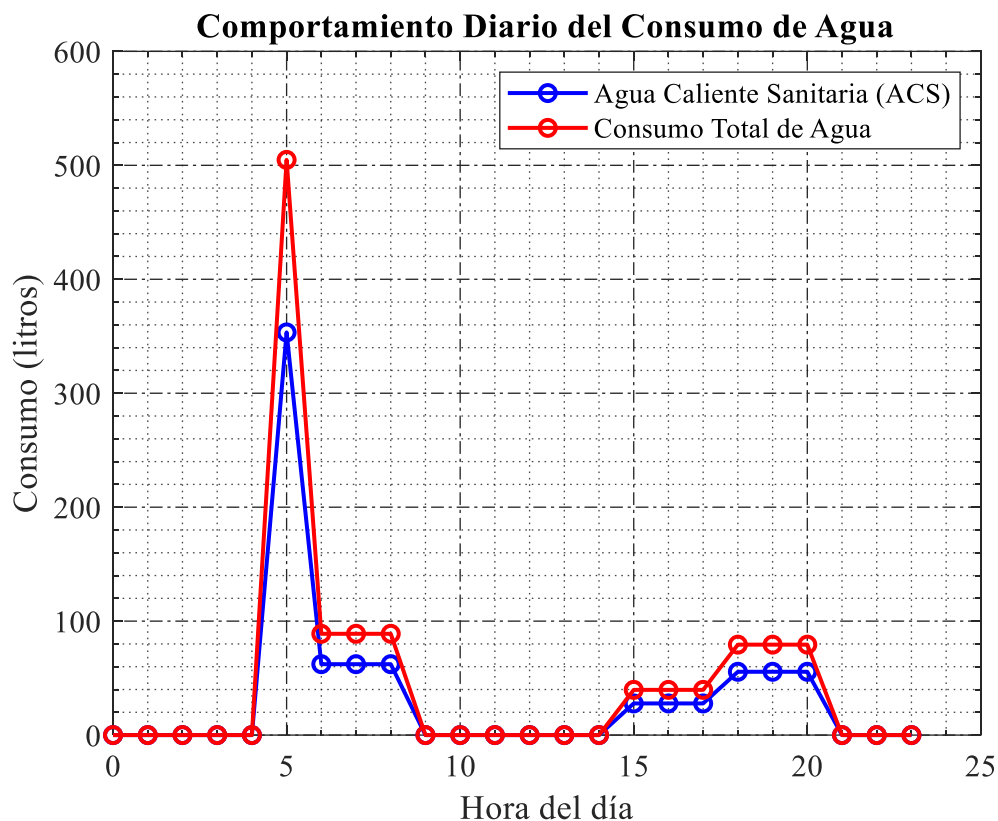


Figura 24. Comportamiento horario del agua en el sitio de estudio.

Fuente: Autor

3.5. Sistema propuesto para el ACS

Se propone un esquema que utiliza una bomba de calor alimentada por un sistema fotovoltaico, para obtener el ACS como se presenta en la Figura 25. Los paneles solares generan energía eléctrica en corriente continua (DC), la cual es gestionada por un inversor para suministrar energía a la bomba de calor.

En este contexto, la bomba de calor extrae energía térmica del aire y transfiere calor al agua almacenada en un depósito principal con un intercambiador de calor interno. Posteriormente, un tanque auxiliar almacena y distribuye el agua caliente al edificio, garantizando un suministro continuo de ACS. Además, el sistema incluye un controlador para regular la temperatura y un tanque de expansión que protege el circuito hidráulico.

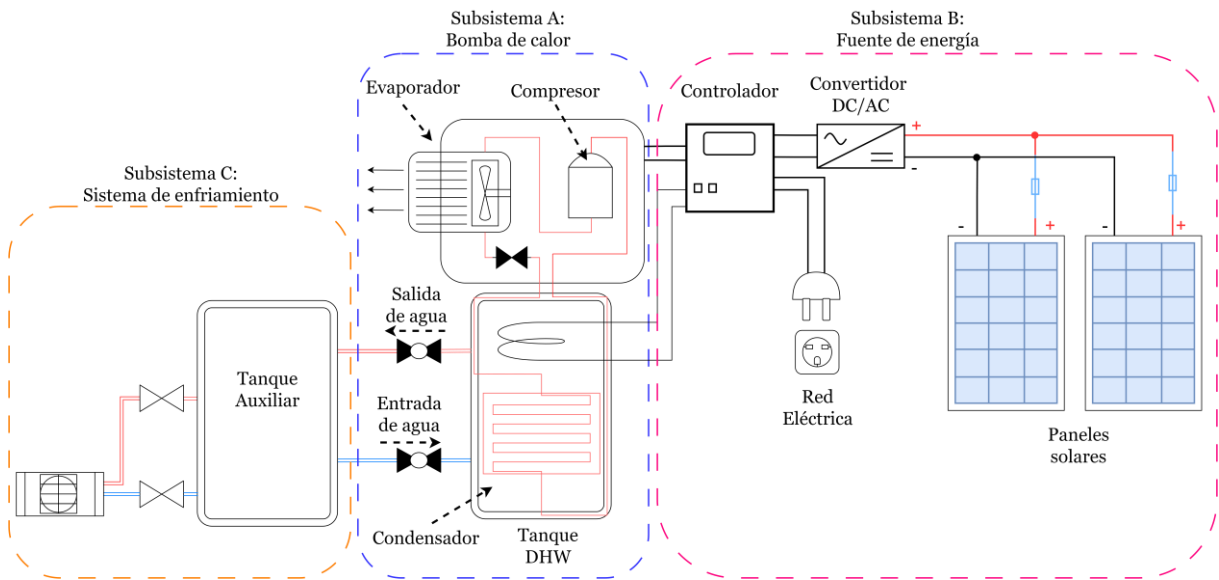


Figura 25. Esquema de ACS propuesto.

Fuente: Autor

3.6. Proceso de selección para la bomba de calor

Para atender de manera eficiente la demanda de agua caliente sanitaria (ACS) en la edificación, el cálculo de la bomba de calor adecuada comienza por analizar el consumo diario estimado. El proceso de diseño incluye tres pasos clave para asegurar que la bomba cumpla con los requerimientos térmicos y energéticos. Primero, se calcula la energía térmica diaria necesaria para elevar el agua a la temperatura de uso, teniendo en cuenta la capacidad calorífica del agua y la diferencia de temperaturas. Luego, se determina la potencia de la bomba de calor que pueda atender las horas de mayor consumo, garantizando que el sistema responda eficazmente en los picos de demanda. Finalmente, se calcula el consumo eléctrico de la bomba, considerando su Coeficiente de Rendimiento (COP), lo cual permite establecer la energía eléctrica requerida para el funcionamiento del sistema. Con esta metodología, se asegura que la bomba de calor se ajuste tanto en capacidad como en eficiencia.

3.6.1. Paso 1: Determinación de la carga térmica para ACS

Para asegurar que el sistema de agua caliente sanitaria funcione con eficacia, es necesario calcular la cantidad de energía térmica que la bomba de calor debe generar cada día. Esta energía se define como el calor total necesario para incrementar la temperatura de

todo el volumen diario de agua desde su punto inicial hasta la temperatura ideal para el consumo. La siguiente ecuación permite realizar este cálculo:

$$Q_{ACS,diario} = V_{ACS,diario} * \rho_{agua} * c_{agua} * (T_{uso} - T_{entrada}) \quad (4)$$

Para calcular la energía térmica necesaria para el agua caliente sanitaria diaria, el volumen de agua ($V_{ACS,diario}$) se representa en metros cúbicos (m^3), y refleja el consumo total de agua caliente cada día. La densidad del agua, expresada como ρ_{agua} , tiene un valor aproximado de $1000 \text{ kg}/m^3$, permitiendo así determinar la masa total de agua involucrada en el sistema con precisión. La capacidad calorífica específica del agua (c_{agua}), estimada en $1.16 \text{ Wh}/(\text{kg}^\circ\text{C})$ o $4.18 \text{ kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$, cuantifica la energía necesaria para elevar la temperatura de cada kilogramo de agua en un grado Celsius.

Asimismo, los parámetros T_{uso} y $T_{entrada}$ definen la temperatura final de uso deseada y la temperatura inicial del agua, respectivamente. La multiplicación de todos estos factores proporciona el valor de la energía térmica en vatios-hora (Wh), que representa el total de energía requerida para alcanzar la temperatura deseada en el volumen de agua utilizado diariamente.

Para realizar este cálculo, se establece un volumen diario de agua caliente sanitaria de 0.79 m^3 , el cual se obtiene sumando todos los consumos horarios de un día entero, una temperatura deseada de uso de 45°C y una temperatura inicial del agua de 15°C . Al sustituir estos valores en la ecuación correspondiente, se obtiene:

$$Q_{ACS,diario} = 0.79 * 1000 * 1.16 * (45 - 15) \quad (5)$$

$$Q_{ACS,diario} = 0.79 * 1000 * 1.16 * 30 = 27490 \text{ Wh} = 27.49 \text{ kWh} \quad (6)$$

Así, la bomba de calor necesita generar alrededor de 27.49 kWh de energía térmica diaria para elevar la temperatura desde 15°C hasta 45°C .

3.6.2. Paso 2: Cálculo de la capacidad térmica instantánea requerida

A partir de la energía térmica requerida diariamente, se establece el cálculo de la potencia necesaria para la bomba de calor, expresada como su capacidad de entregar energía de forma continua a lo largo del tiempo. Esta potencia debe estar dimensionada para satisfacer los picos de consumo, como los que ocurren típicamente en las mañanas, cuando la demanda de agua caliente sanitaria (ACS) tiende a aumentar. Para obtener el valor de la potencia requerida, se divide la energía térmica diaria entre el intervalo de tiempo en el cual se espera que la bomba de calor cubra estas necesidades. La fórmula empleada para este cálculo es la siguiente:

$$P_{HP} = \frac{Q_{ACS,diario}}{t_{calentamiento}} \quad (7)$$

En el cálculo de la potencia térmica necesaria, la bomba de calor se dimensiona para proporcionar una capacidad que cubra la demanda de agua caliente sanitaria durante los momentos de mayor consumo. La potencia, denotada como P_{HP} , indica la energía por unidad de tiempo que el sistema debe entregar, mientras que $Q_{ACS,diario}$ representa la energía total requerida en un día, equivalente a 27.49 kWh. Para garantizar que la bomba de calor esté preparada para los picos de demanda, se estima que el periodo de calentamiento crítico es de 3 horas, por ejemplo, de 6:00 a 9:00 a.m., y se utilizan estos parámetros en la fórmula para obtener el valor de potencia requerido.

$$P_{HP} = \frac{27.49 \text{ kWh}}{3 \text{ h}} = 9.16 \text{ kW} \quad (8)$$

Para cumplir con las necesidades de agua caliente sanitaria (ACS) durante los picos de consumo, se requiere que la bomba de calor posea una capacidad térmica cercana a los 9.16 kW. Este nivel de potencia permite al sistema proporcionar la energía necesaria en un lapso de 3 horas, asegurando que el suministro de ACS sea constante y suficiente en los momentos de mayor demanda, evitando así cualquier demora en el proceso de calentamiento.

3.6.3. Paso 3: Análisis de la potencia eléctrica necesaria para el sistema de la bomba de calor

El cálculo del consumo eléctrico de la bomba de calor se basa en la eficiencia reflejada en su Coeficiente de Rendimiento (COP). Este indicador muestra cuánta energía térmica puede generar la bomba por cada unidad de energía eléctrica que consume, proporcionando una medida clara de su eficacia. Por ejemplo, en dispositivos de alta eficiencia, un COP cercano a 4 indica que, por cada kW de electricidad utilizado, la bomba entrega 4 kW de energía térmica. Así, la relación entre la potencia térmica suministrada P_{HP} y la potencia eléctrica requerida (P_{el}) queda representada por la siguiente ecuación:

$$P_{el} = \frac{P_{HP}}{COP} \quad (9)$$

La ecuación establece que P_{el} , la potencia eléctrica requerida en kW se relaciona directamente con P_{HP} , la potencia térmica de la bomba de calor estimada en 9.16 kW, y con el Coeficiente de Rendimiento (COP), que se considera en 4 para este cálculo. Este valor es respaldado por Sezen (2023), el cual menciona que para viviendas la bomba de calor, el COP alcanza valores promedio de 4.17. Al introducir estos valores en la ecuación, se obtiene:

$$P_{el} = \frac{9.16 \text{ kW}}{4} = 2.29 \text{ kW} \quad (10)$$

La potencia eléctrica de 2.29 kW es indispensable para que la bomba de calor funcione y pueda suministrar los 9.16 kW de energía térmica requeridos en momentos de alta demanda.

3.6.4. Paso 4: Dimensionamiento de capacidad de depósito primario

El tanque de la bomba de calor debe ser capaz de almacenar el volumen total diario de agua caliente sanitaria (ACS). Esta capacidad permite calentar el agua una vez al día, manteniéndola disponible sin necesidad de encendidos frecuentes, lo que mejora la eficiencia energética del sistema. La capacidad del tanque se calcula mediante la Ecuación 11.

$$V_{tanque_BC} = \frac{Q_{ACS,diario}}{\rho_{agua} * c_{agua} * (T_{uso} - T_{entrada})} \quad (11)$$

Sustituyendo los valores previamente calculados:

$$V_{tanque_BC} = \frac{27490}{1000 * 1.16 * (45 - 15)} = \frac{27490}{34800} = 0.79 \text{ m}^3 \quad (12)$$

Por lo tanto, la capacidad mínima requerida para el tanque primario es de 0.79 m^3 . Este volumen asegura que se pueda almacenar toda el agua caliente necesaria para satisfacer la demanda diaria del edificio. Si bien no existe un valor comercial de 0.79 m^3 , se opta por elegir un tanque de 1 m^3 , considerando un factor de seguridad en caso de crecer la demanda de ACS.

3.6.5. Paso 5: Dimensionamiento de tanque auxiliar

El tanque auxiliar se dimensiona para garantizar la disponibilidad de agua caliente durante los picos de demanda, es decir, en los periodos de mayor consumo. En este caso, el pico de consumo se identifica entre las 6:00 a. m. y las 9:00 a. m., cuando varias personas utilizan el agua caliente sanitaria (ACS) simultáneamente.

El volumen del tanque auxiliar se calcula considerando el agua utilizada exclusivamente durante ese periodo, lo que asegura un suministro continuo en horas críticas. La Ecuación 13 se usa para tal fin.

$$V_{tanque_aux} = \sum_{h \in n_{pico}} \frac{Consumo_{ACS,h}}{\rho_{agua} * c_{agua} * (T_{uso} - T_{entrada})} \quad (13)$$

En esta expresión,

h_{pico} se refiere a las horas de mayor consumo (6:00 a. m. a 9:00 a. m.).

$Consumo_{ACS,h}$ corresponde al consumo horario de ACS durante esas horas.

En este caso, el consumo estimado es de aproximadamente 190 litros o $0.19 m^3$. Sustituyendo en la Ecuación 13 se obtiene la Ecuación 14.

$$V_{tanque_aux} = \frac{190}{1000} = 0.19 m^3 \quad (14)$$

Por lo tanto, se requiere un tanque auxiliar con capacidad mínima de $0.19 m^3$ para garantizar un suministro adecuado de ACS durante los picos de demanda. De la misma forma, la capacidad el tanque auxiliar considerando el factor de seguridad da como resultado un tanque de $0.5 m^3$.

3.6.6. Paso 6: Estimación de demanda energética de ACS

El análisis de la demanda energética mensual y anual de la bomba de calor, basado en la estimación del consumo de agua caliente sanitaria (ACS), indica un volumen diario promedio de 790 litros, lo que equivale a un total anual aproximado de 288,350 litros.

Los meses con 31 días (enero, marzo, mayo, julio, agosto, octubre y diciembre) presentan el mayor consumo energético, alcanzando aproximadamente 24,490 litros/mes y una demanda de 852.25 kWh/mes. En los meses con 30 días, el consumo desciende ligeramente a 23,700 litros/mes, con una demanda de 824.76 kWh/mes. Por otro lado, febrero, al contar con 28 días, registra el menor consumo con 22,120 litros/mes y 769.78 kWh/mes.

El consumo eléctrico, calculado con un coeficiente de desempeño (COP) de 4, oscila entre 192.44 kWh y 213.06 kWh mensuales, sumando un total anual de 2,508.65 kWh. Estos valores reflejan la alta eficiencia energética del sistema.

Tabla 2. Estimación de consumo de bomba de calor anual.

Mes	Días	T (°C)	Q_{mes} (l/mes)	DE_{mes} (kWh/mes)	COP	Consumo Eléctrico (kWh/mes)
Enero	31	30	24.490	852.252	4	213.063
Febrero	28	30	22.120	769.776	4	192.444
Marzo	31	30	24.490	852.252	4	213.063
Abril	30	30	23.700	824.760	4	206.190
Mayo	31	30	24.490	852.252	4	213.063
Junio	30	30	23.700	824.760	4	206.190
Julio	31	30	24.490	852.252	4	213.063

Agosto	31	30	24.490	852.252	4	213.063
Septiembre	30	30	23.700	824.760	4	206.190
Octubre	31	30	24.490	852.252	4	213.063
Noviembre	30	30	23.700	824.760	4	206.190
Diciembre	31	30	24.490	852.252	4	213.063
TOTAL	365	30	288.350	10034.580	-	2508.645 (kWh/año)

Fuente: Autor

3.7. Condiciones ambientales en la zona de estudio

El análisis de la situación climática en el sitio de estudio revela que la radiación solar varía a lo largo del año. Los valores mínimos se registran en febrero con aproximadamente 1.1 kWh/m², mientras que los máximos alcanzan 3.2 kWh/m² en diciembre, reflejando una mayor disponibilidad solar a finales de año.

Por su parte, la temperatura ambiente se mantiene relativamente estable, oscilando entre 11.6 °C en los meses más fríos (julio y agosto) y 13.8 °C en los más cálidos (enero y diciembre). Estas condiciones reflejan un potencial solar moderado, con ligeras variaciones térmicas a lo largo del año.

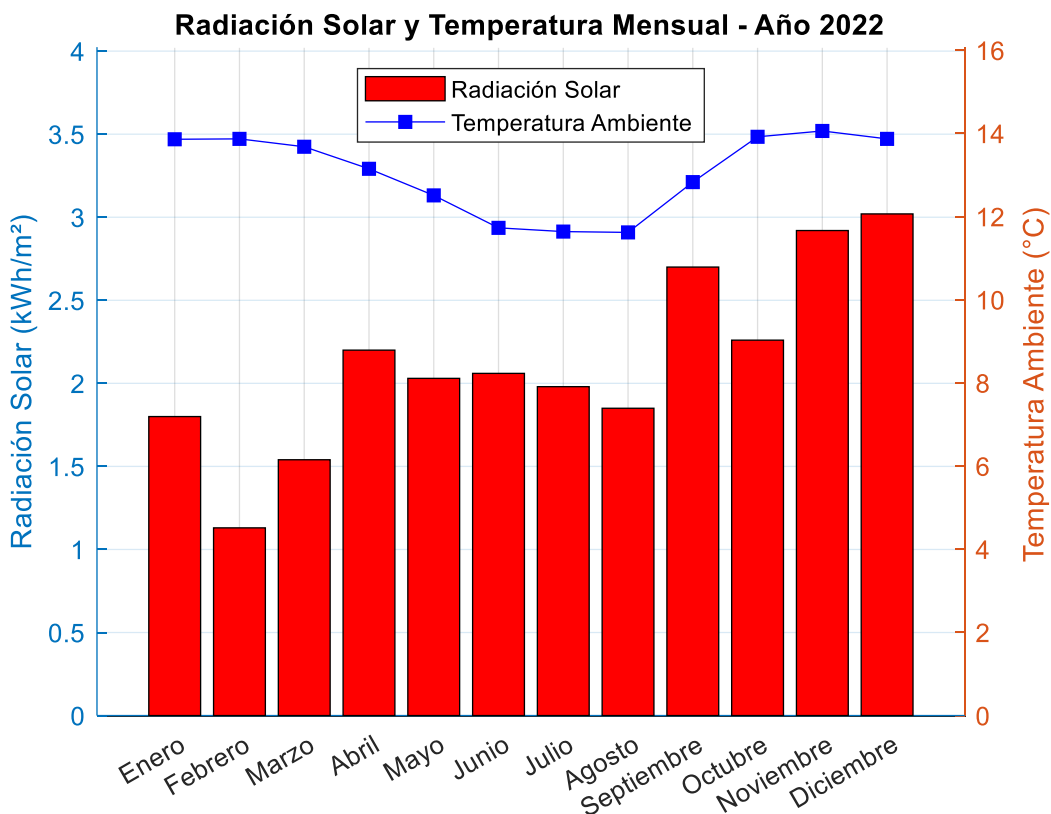


Figura 26. Comportamiento climático en zona de estudio

Fuente: Autor

3.8. Análisis del recurso solar

El dimensionamiento del sistema fotovoltaico que alimentará la bomba de calor requiere un análisis detallado del recurso solar disponible en el sitio de estudio. Este análisis se basa en datos de radiación solar obtenidos de la plataforma NASA Data Access Viewer, los cuales permiten evaluar la disponibilidad energética en escalas diaria, mensual y anual.

La información recopilada es necesaria para determinar la capacidad de generación del sistema fotovoltaico. Esto asegura que el sistema pueda satisfacer la demanda energética de la bomba de calor de manera eficiente y continua, incluso en periodos de menor irradiancia.

3.8.1. Comportamiento diario

El análisis del ciclo diario representativo de irradiancia como se muestra en la Figura 27, basado en datos horarios del año 2022, refleja un patrón típico de generación solar en el sitio de estudio. La irradiancia promedio comienza a aumentar de manera significativa a partir de las 6:00 a. m., alcanzando su valor máximo entre las 8:00 a. m. y las 3:00 p. m., con valores que oscilan entre 187 Wh/m² y 229 Wh/m².

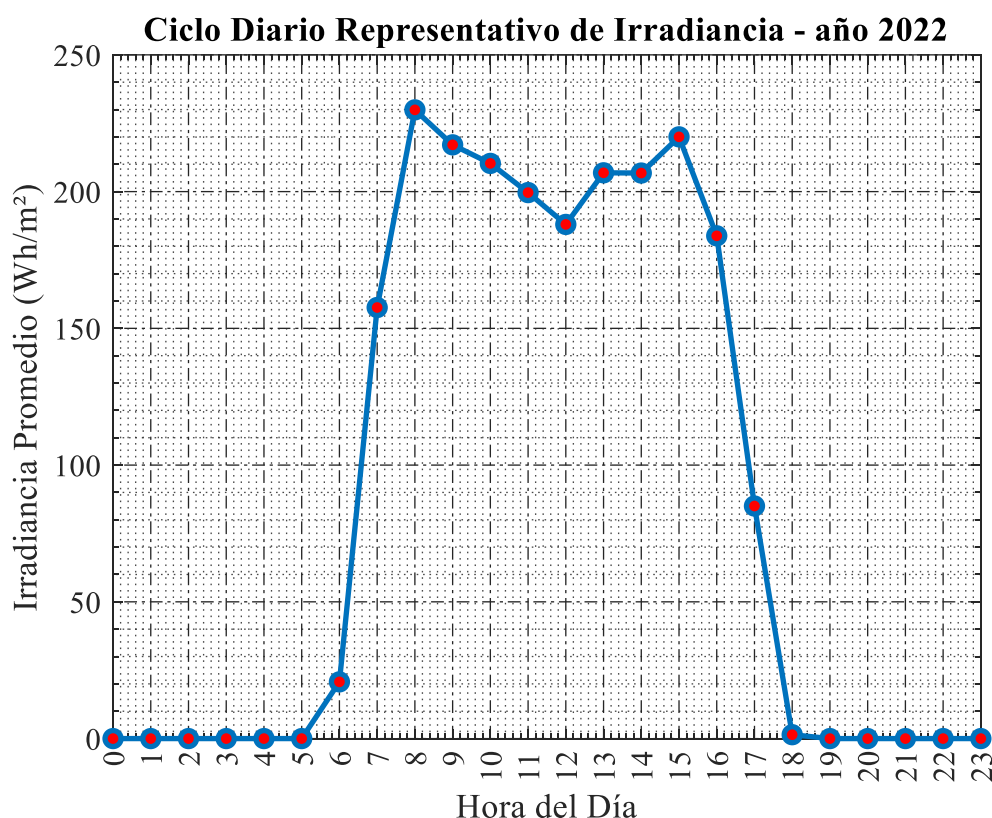


Figura 27. Comportamiento representativo diario de irradiancia en zona de estudio.

Fuente: Autor

Posteriormente, la irradiancia disminuye gradualmente hasta desaparecer por completo a partir de las 6:00 p. m. Este patrón indica un periodo efectivo de generación solar

de aproximadamente 8 horas diarias, concentrando la mayor intensidad entre las 10:00 a. m. y las 3:00 p. m.

Por otro lado, el análisis de la variabilidad horaria de la irradiancia directa normal, representado en el boxplot de la Figura 28, muestra la distribución estadística de los datos por hora del día. La irradiancia presenta mayor dispersión entre las 10:00 a. m. y las 2:00 p. m., con amplios rangos intercuartílicos y máximos que alcanzan hasta 700 Wh/m². Esto indica una alta disponibilidad solar durante este periodo.

Por el contrario, las primeras horas de la mañana (6:00 a. m.) y las últimas de la tarde (5:00 p. m. a 6:00 p. m.) registran medianas más bajas y una mayor presencia de valores atípicos, representados como puntos rojos. Este patrón refleja una mayor incertidumbre en la generación solar en esos horarios.

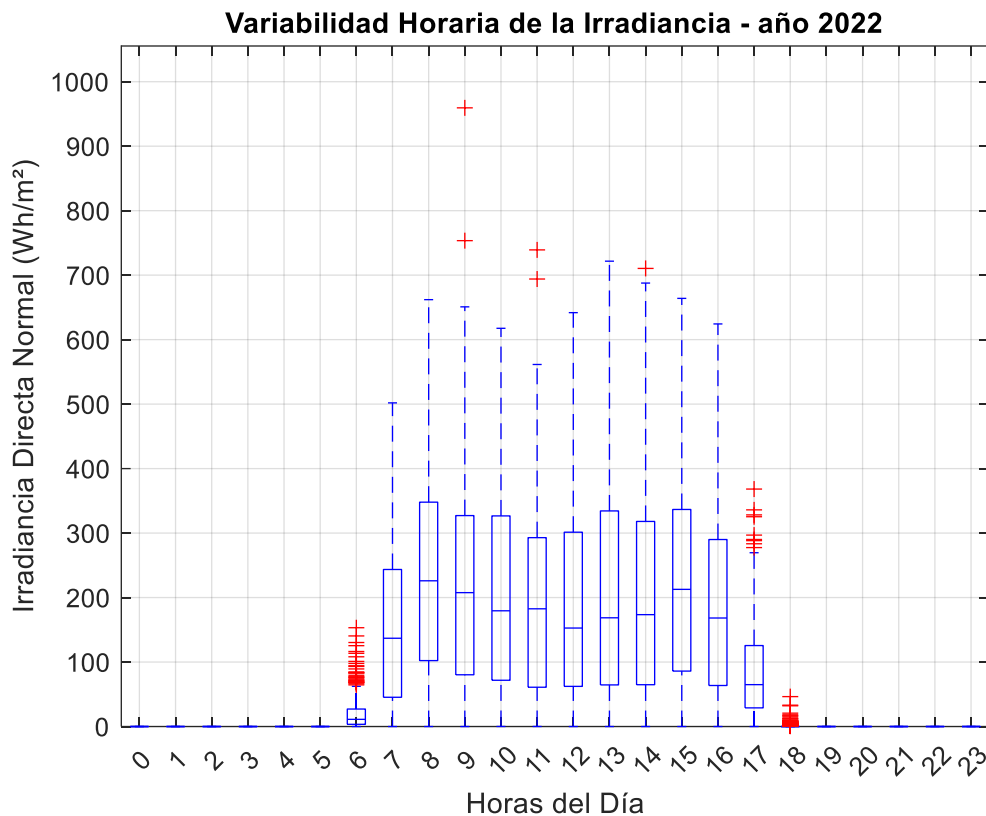


Figura 28. Variabilidad diaria de irradiancia en zona de estudio.

Fuente: Autor

3.8.2. Análisis del comportamiento mensual

Entre enero y junio como se observa en la Figura 29, la irradiancia sigue un patrón consistente de aumento desde las 6:00 a. m., alcanzando un máximo cercano a 400 W/m² entre las 10:00 a. m. y las 2:00 p. m. Posteriormente, disminuye de manera progresiva hasta desaparecer alrededor de las 6:00 p. m.

Asimismo, en marzo y mayo, el pico de irradiancia es más uniforme, mientras que en febrero y abril se observan pequeñas fluctuaciones durante las horas centrales del día. Este comportamiento refleja variaciones estacionales mínimas en la estabilidad del recurso solar.

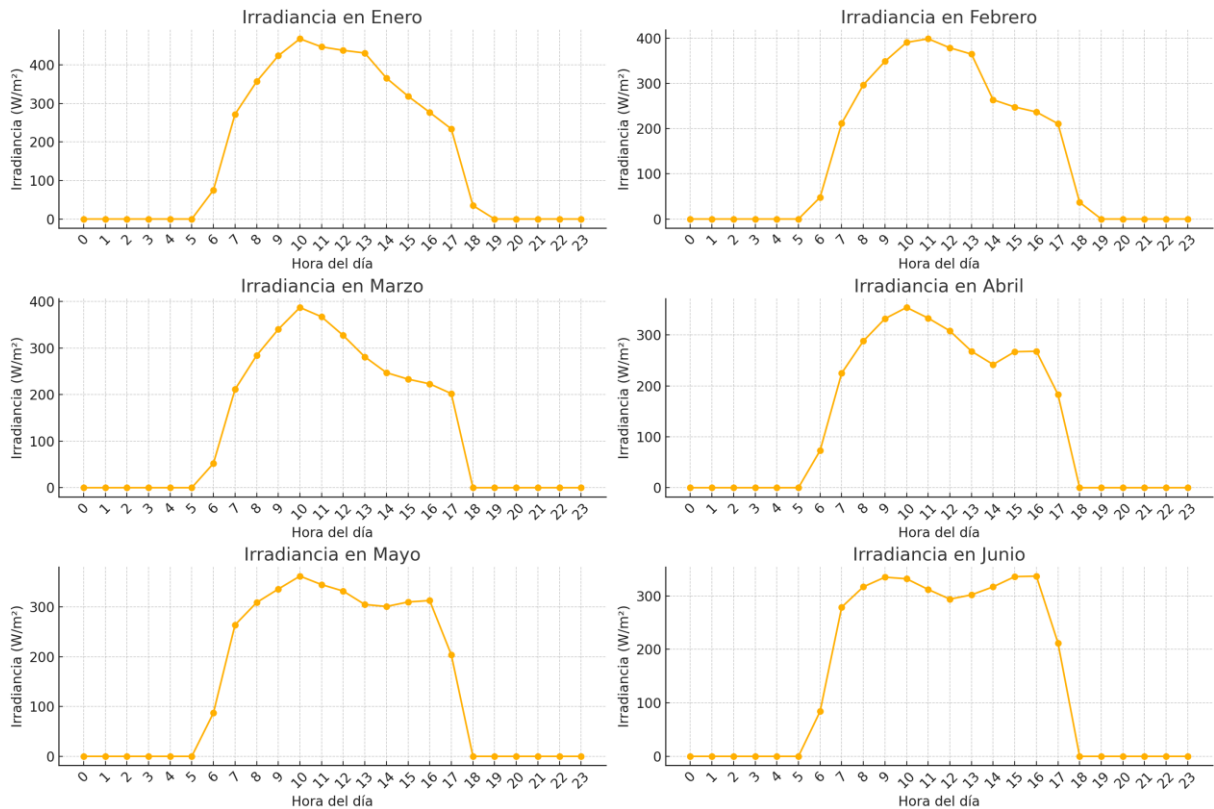


Figura 29. Comportamiento mensual de irradiancia de enero a junio en zona de estudio.

Fuente: Autor, información tomada de NASA (2024).

Por su parte, de julio a diciembre como se expone en la Figura 30, la irradiancia sigue un patrón similar al de la primera mitad del año, aunque con máximos más altos, alcanzando hasta $500 W/m^2$ en diciembre.

Entre septiembre y diciembre, la intensidad solar es mayor durante las horas centrales del día y presenta una curva más uniforme. En contraste, julio y agosto muestran un ligero descenso en los picos de irradiancia.

Este patrón indica una mayor disponibilidad solar hacia finales de año, con una generación confiable y estable entre las 10:00 a. m. y las 3:00 p. m., lo cual resulta ideal para el aprovechamiento fotovoltaico.

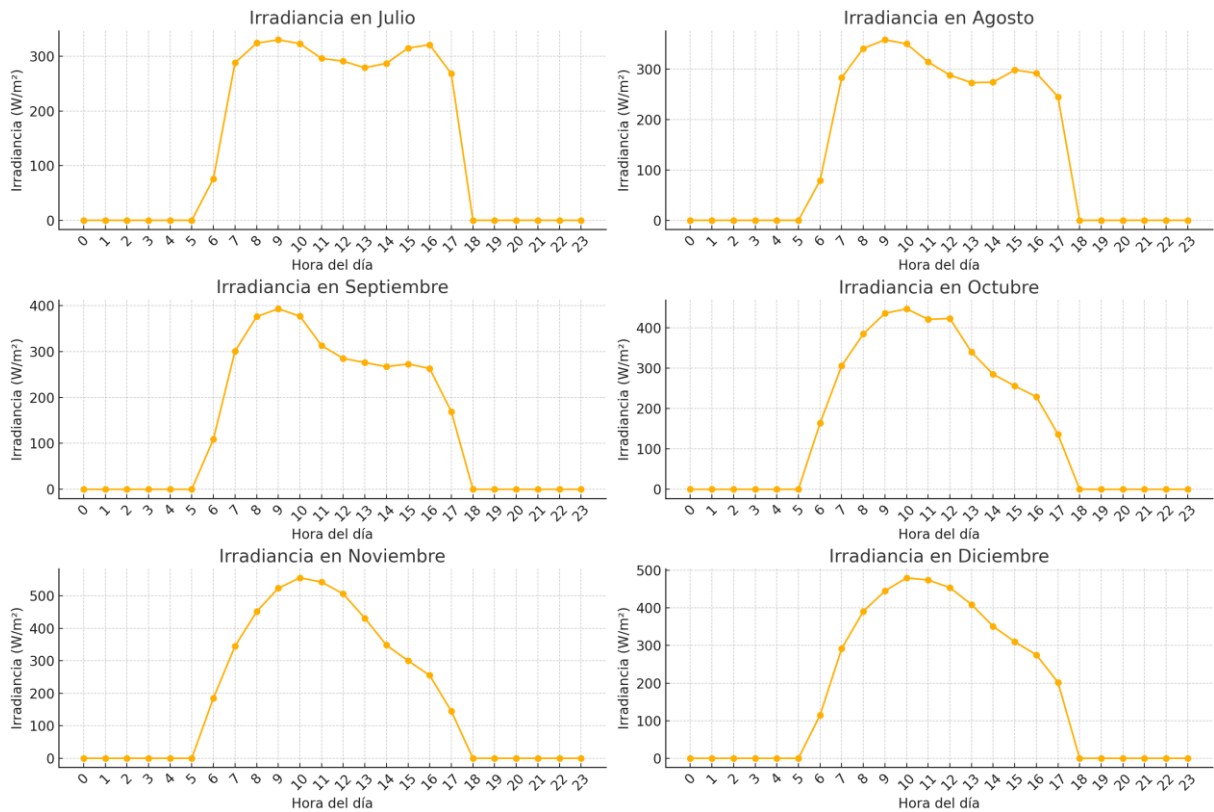


Figura 30. Comportamiento mensual de irradiancia de julio a diciembre en zona de estudio.

Fuente: Autor, información tomada de NASA (2024).

3.8.3. Análisis del comportamiento anual

La Figura 31 corresponde a la irradiancia anual promedio (2012-2022), misma que revela una notable variabilidad interanual. El pico máximo se registra en 2016 con 2.52 kWh/m², mientras que el mínimo ocurre en 2022 con 2.12 kWh/m².

Se observa una ligera tendencia descendente hacia el final del período, lo que podría indicar cambios en las condiciones climáticas o en factores externos que afectan la captación solar. El año 2016 destaca como el más favorable, posiblemente debido a condiciones atmosféricas favorables, mientras que 2021 y 2022 presentan valores consecutivamente bajos.

El comportamiento puede deberse al aumento de contaminantes atmosféricos. Por ejemplo, existen reportes en donde mencionan que existe un incremento en la generación de material particulado (MP10 y MP2.5). Lo que produce que se reduzca la transparencia en la atmosfera, por lo que, se limita la cantidad de radiación solar directa que llega a la superficie de la tierra (EMOV, 2022).

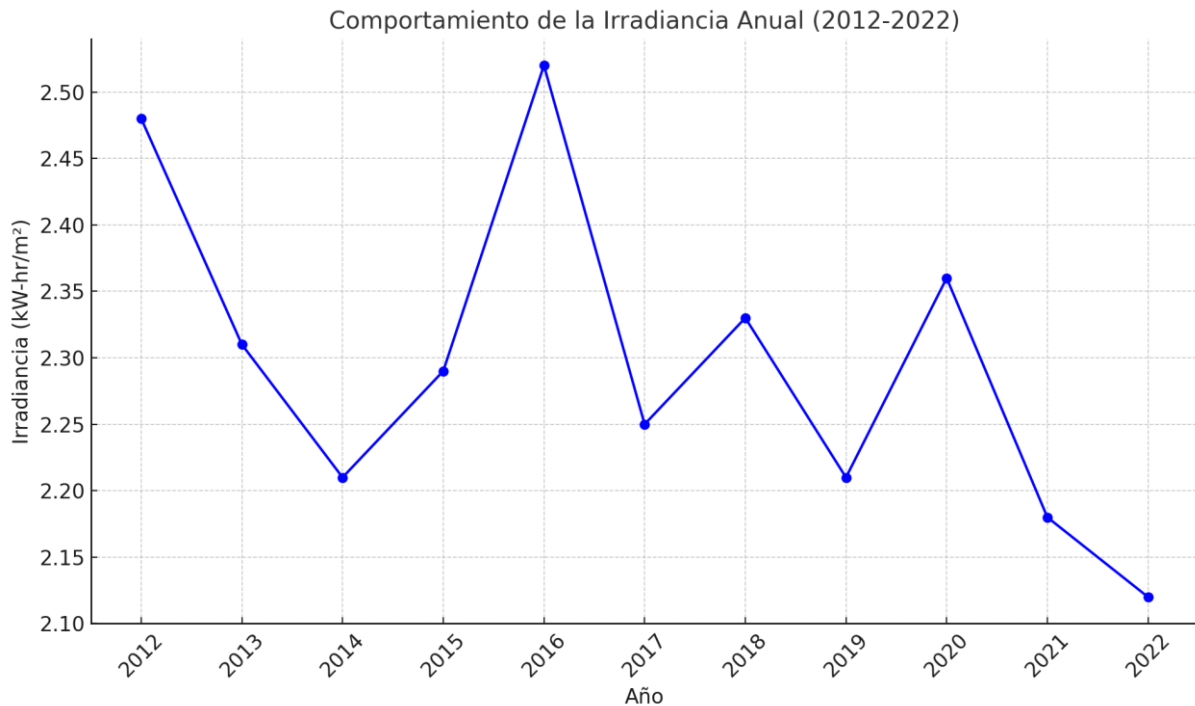


Figura 31. Comportamiento anual de irradiancia en zona de estudio.

Fuente: Autor, información tomada de NASA (2024).

3.8.4. Horas solares pico (HSP)

Al analizar la HSP, que se presente en la Tabla 3, se evidencia una variación mensual significativa, reflejando la disponibilidad del recurso solar a lo largo del año. Los valores más altos se registran en noviembre (4.586 HSP) y diciembre (4.198 HSP), indicando un mayor potencial de generación fotovoltaica durante estos meses. No obstante, marzo (3.154 HSP) y abril (3.141 HSP) presentan los valores más bajos, lo que representa los periodos de menor disponibilidad solar.

En consecuencia, el promedio anual de las HSP es de aproximadamente 3.76 HSP/día, lo que implica que el sistema fotovoltaico dispondrá, en promedio, de ese equivalente de horas diarias de radiación máxima para generar energía.

Tabla 3. Estimación del número de horas solares pico en zona de estudio

Horario	Radiación normal directa [Wh/m²]											
	Ene	Febr	Mar	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agost	Sep	Oct	Nov	Dic
0 - 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 - 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 - 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 - 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4 - 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5 - 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6 - 7	75	48	52	73	87	84	76	79	109	164	185	115
7 - 8	272	212	211	225	264	279	288	283	301	306	345	292
8 - 9	357	297	284	288	309	317	324	341	376	385	451	391

Horario	Radiación normal directa [Wh/m ²]											
	Ene	Febr	Mar	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agost	Sep	Oct	Nov	Dic
9 - 10	424	349	340	332	336	335	330	358	393	436	523	445
10 - 11	468	391	387	354	362	332	323	350	377	447	555	480
11 - 12	447	399	367	333	345	312	296	314	313	421	542	474
12 - 13	438	379	327	308	332	294	291	288	285	423	506	454
13 - 14	431	365	281	268	305	302	279	273	276	340	431	409
14 - 15	366	264	247	242	301	317	287	274	267	285	348	351
15 - 16	319	248	233	267	310	336	315	298	273	256	300	310
16 - 17	277	237	223	268	313	337	321	292	263	229	255	275
17 - 18	234	211	202	183	204	212	268	245	169	136	145	202
18 - 19	35	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19 - 20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20 - 21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21 - 22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22 - 23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23 - 24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	4143	3437	3154	3141	3468	3457	3398	3395	3402	3828	4586	4198
Horas solares Pico	4,143	3,437	3,154	3,141	3,468	3,457	3,398	3,395	3,402	3,828	4,586	4,198

Fuente: Autor, información tomada de DTU Wind Energy & World Bank Group (2024).

3.9. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

Para dimensionar el sistema fotovoltaico que suministrará energía a la bomba de calor, se inicia con la selección del panel fotovoltaico. Este proceso considera su potencia nominal, eficiencia y capacidad de generación bajo las condiciones específicas del sitio de estudio.

Una vez seleccionado el panel, se procede al dimensionamiento del inversor, asegurando que pueda manejar la potencia total generada por el arreglo fotovoltaico. Adicionalmente, se dimensiona el controlador para garantizar una gestión eficiente de la energía generada y su entrega al sistema de la bomba de calor.

3.9.1. Selección de panel fotovoltaico

Dado que el sistema de bomba de calor es de alta eficiencia, la selección del panel fotovoltaico debe centrarse en opciones que ofrezcan alta eficiencia, durabilidad y rendimiento estable. Por tanto, la Tabla 4 expone las características técnicas de cinco paneles solares destacados. Los parámetros evaluados incluyen eficiencia, tolerancia de potencia, coeficiente de temperatura, rendimiento en baja irradiancia y certificaciones, lo que permite identificar opciones confiables y de alto desempeño.

Tabla 4. Comparativa de paneles solares.

Parámetro	SunPower Maxeon 3 (430 W)	Longi Solar Hi-MO 6 Scientist (440 W)	Canadian Solar HiHero C6SR (440 W)	REC Solar Alpha Pure R (430 W)	JA Solar Deep Blue 3.0 Light (410 W)
Tipo de celda	Monocristalina PERC	Monocristalina PERC	Monocristalina PERC	Monocristalina PERC	Monocristalina PERC
Eficiencia (%)	22.7	22.5	22.5	22.3	21.3
Voltaje nominal	40.1 V	41.5 V	41.0 V	40.8 V	41.0 V
Corriente nominal (Imp)	10.74 A	10.62 A	10.71 A	10.53 A	10.10 A
Coefficiente de temperatura	-0.29%/°C	-0.35%/°C	-0.34%/°C	-0.30%/°C	-0.35%/°C
Tolerancia de potencia	0/+5%	0/+5%	0/+5%	0/+5%	0/+5%
Rendimiento baja irradiancia	>92%	>90%	>90%	>92%	>90%
Degradación anual	0.25%	0.30%	0.30%	0.25%	0.30%
Resistencia al viento/nieve	2400 Pa / 5400 Pa	2400 Pa / 5400 Pa	2400 Pa / 5400 Pa	2400 Pa / 5400 Pa	2400 Pa / 5400 Pa
Conectores	MC4	MC4	MC4	MC4	MC4
Certificaciones	IEC 61215, IEC 61730	IEC 61215, IEC 61730	IEC 61215, IEC 61730	IEC 61215, IEC 61730	IEC 61215, IEC 61730
Costo aproximado (USD)	584	500	400	441	380
Costo por watt (USD/W)	1.05	1.14	0.91	0.91	0.93
Referencia	(SunFields, 2025)	(Efecto Solar, 2025)	(SunFields, 2025)	(SunFields, 2025)	(SunFields, 2025)

Fuente: (SunFields, 2025)

Considerando el equilibrio entre costo y eficiencia, el Canadian Solar HiHero C6SR (440 W) presenta el costo por watt más bajo, con un valor de 0.91 USD/W. Este panel también ofrece una eficiencia del 22.5 %, lo que lo posiciona como una opción atractiva para maximizar la producción energética dentro de un presupuesto limitado.

3.9.2. Cálculo de la eficiencia del sistema

La eficiencia global del sistema fotovoltaico ($\eta_{sistema}$) determina la proporción de la radiación solar captada que se convierte en energía eléctrica útil. Este cálculo considera pérdidas desde la captación de radiación hasta la entrega de energía al inversor.

Las principales pérdidas incluyen la eficiencia del panel, las pérdidas por temperatura, las ineficiencias del inversor, las pérdidas en el cableado y los efectos de suciedad o sombreado. Estos factores se modelan mediante la Ecuación 15.

$$\eta_{sistema} = \eta_{panel} * \eta_{temperatura} * \eta_{inversor} * \eta_{cableado} * \eta_{otros} \quad (15)$$

Las magnitudes consideradas para cada componente son,

η_{panel} se obtiene del panel fotovoltaico seleccionado (22.3%).

$\eta_{temperatura}$ se refiere a las pérdidas por temperatura asignada como el 5%.

$\eta_{inversor}$ corresponde a las pérdidas por conversión del inversor, asumida como el 5%.

$\eta_{cableado}$ indica las pérdidas por el cableado, considerado como el 2%.

Al sustituir los valores considerados se tiene la Ecuación 16.

$$\eta_{sistema} = 0.223 * 0.95 * 0.95 * 0.98 * 0.90 = 0.176 = 17.6\% \quad (16)$$

Esto indica que solo el 17.6 % de la radiación captada se convierte en energía eléctrica útil. Por lo tanto, este valor refleja las condiciones reales de operación y se usa como base para el cálculo de generación.

3.9.3. Energía genera por panel

La energía diaria generada por un panel (E_{panel}) permite dimensionar la cantidad de paneles necesarios para satisfacer la demanda. Esta magnitud se cuantifica mediante la Ecuación 17 (Peñañiel, 2024).

$$E_{panel} = P_{panel} * HSP * \eta_{sistema} \quad (17)$$

En esta expresión,

P_{panel} se refiere a la potencia nominal del panel seleccionado, el cual es un valor de 440 W.

HSP corresponde a las horas solares pico promedio anual, que para el caso de estudio es de 3.76 horas por día.

$\eta_{sistema}$ indica la eficiencia del sistema, la cual, se calculó anteriormente y registra un valor de 0.176.

Al sustituir estos valores en la Ecuación 17, se obtiene la Ecuación 18.

$$E_{panel} = 440 * 3.76 * 0.176 = 0.291 \text{ kWh/día} \quad (18)$$

Por lo tanto, un panel genera aproximadamente 0.291 kWh/día bajo las condiciones promedio del sitio de estudio.

3.9.4. Número de paneles requeridos

La cantidad de dispositivos necesarios ($N_{paneles}$) se calcula dividiendo la demanda diaria entre la energía generada por un panel. Lo cual, se puede representar mediante la Ecuación 19.

$$N_{paneles} = \frac{E_{diaria}}{E_{panel}} \quad (19)$$

Aquí,

E_{diaria} corresponde a la demanda diaria de la bomba de calor, asignada con una magnitud de 6.87 kWh/día.

E_{panel} indica la energía generada por un panel, que adopta un valor de 0.291 kWh/día.

Sustituyendo los valores considerados para el diseño se obtiene la Ecuación 20.

$$N_{paneles} = \frac{6.87 \text{ kWh/día}}{0.291 \text{ kWh/día}} = 23.61 \quad (20)$$

Redondeando al siguiente entero, se requieren 24 paneles para satisfacer la demanda de la bomba de calor.

3.9.5. Disposición del esquema fotovoltaico

La configuración del arreglo fotovoltaico se realiza mediante conexiones en serie y paralelo para alcanzar los valores de voltaje y corriente requeridos por el inversor y el controlador. Para este caso se propone 6 ramas en paralelo y en cada una de estas 4 en serie.

Cuando los paneles se conectan en serie, sus voltajes (V_{mp}) se suman. Con 4 paneles en serie se tiene lo que expresa la Ecuación 21.

$$V_{serie} = N_{serie} * V_{mp} = 4 * 40.8V = 163.2V \quad (21)$$

Por su parte, al conectar los dispositivos en paralelo sus corrientes I_{mp} se suman. Con lo cual, las seis ramas en paralelo se calculan mediante la Ecuación 22.

$$I_{paralelo} = N_{paralelo} * I_{mp} = 6 * 10.53A = 63.18A \quad (22)$$

3.9.6. Selección del inversor

El inversor es un componente esencial en el sistema fotovoltaico, ya que convierte la corriente continua (DC) generada por los paneles en corriente alterna (AC). Lo cual, es indispensable para el funcionamiento de la bomba de calor. Su selección debe cumplir con criterios técnicos que garanticen compatibilidad con las características del sistema y un desempeño eficiente.

En primer lugar, la potencia nominal del inversor debe ser igual o superior a la potencia generada por el sistema, misma que se calcula mediante la Ecuación 23.

$$P_{sistema} = N_{paneles} * P_{panel} = 24 * 440W = 10560W = 10.56kW \quad (23)$$

Además, el rango de voltaje de entrada debe incluir el voltaje total generado por los paneles en serie, que es de 163.2 V. Por último, la corriente máxima de entrada debe ser igual o mayor a la corriente generada por las ramas conectadas en paralelo, calculada como 63.18 A, evitando sobrecargas o limitaciones en el desempeño. De manera que, los criterios de selección se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Comparativa de paneles solares.

Criterio	Descripción	Valor Requerido
Potencia nominal	Debe ser igual o superior a la potencia generada	$P_{sistema} \geq 10.56kW$
Rango de voltaje de entrada	Debe incluir el voltaje total del arreglo en serie	$V_{serie} \geq 163.2V$
Corriente máxima de entrada	Debe ser igual o mayor a la corriente total del arreglo	$I_{paralelo} \geq 63.18 A$

Fuente: Autor

Es así como, el inversor que cumple con todas las especificaciones definidas es el Fronius Symo Hybrid 15.0-3-S. Las características técnicas de este equipo se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Características técnicas del inversor seleccionado.

Especificaciones	Valor
Modelo	Fronius Symo 12.0-3-M
Potencia nominal	12,000 W
Rango de voltaje de entrada	150–1,000 V
Corriente máxima de entrada	66 A
Eficiencia máxima	98%

Especificaciones	Valor
Rango de temperatura operativa	-25 °C a 60 °C
Protección IP	IP66
Comunicación integrada	WLAN, Ethernet, y Datamanager integrado
Peso	34.8 kg
Dimensiones	645 x 431 x 204 mm
Costo	2,500 USD
Referencia del datasheet	(Fronius, 2022)

Fuente: (Fronius, 2022)

3.9.7. Análisis del espacio requerido

El espacio necesario para la instalación se calcula considerando el área de los paneles y un margen adicional del 20 % para facilitar el mantenimiento. Lo cual, se expresa en la Ecuación 24 y 25.

$$A_{total} = N_{paneles} * A_{panel} = 24 * 1.7 = 40.8 m^2 \quad (24)$$

$$P_{final} = A_{total} + 0.20 * A_{total} = 40.8 + 8.16 = 48.96 m^2 \quad (25)$$

En consecuencia, el área obtenida del arreglo propuesto es de $48.96 m^2$, lo cual, es ideal y cumple con el área disponible del área de estudio que es de $240 m^2$.

3.10. Balance energético

El sistema fotovoltaico diseñado para alimentar la bomba de calor cubre completamente la demanda energética mensual durante todo el año, como se detalla en la Tabla 7 del balance energético. Incluso en meses de menor irradiación solar, como marzo (3.15 HSP) y abril (3.14 HSP), el sistema genera 218.063 kWh y 210.159 kWh, respectivamente. Estas cifras superan ligeramente la demanda mensual, estimada en 213.063 kWh para marzo y 206.190 kWh para abril, resultando en excedentes pequeños de 5.000 kWh y 3.969 kWh.

Tabla 7. Balance energético del sistema diseñado.

Mes	Días	HSP	Demanda (kWh)	Energía Generada (kWh)	Excedente (kWh)
Enero	31	4,14	213,063	286,441	73,378
Febrero	28	3,44	192,444	214,632	22,188
Marzo	31	3,15	213,063	218,063	5,000
Abril	30	3,14	206,19	210,159	3,969
Mayo	31	3,47	213,063	239,772	26,709
Junio	30	3,46	206,19	231,302	25,112
Julio	31	3,4	213,063	234,932	21,869
Agosto	31	3,4	213,063	234,725	21,662
Septiembre	30	3,4	206,19	227,622	21,432
Octubre	31	3,83	213,063	264,662	51,599

Mes	Días	HSP	Demanda (kWh)	Energía Generada (kWh)	Excedente (kWh)
Noviembre	30	4,59	206,19	306,841	100,651
Diciembre	31	4,2	213,063	290,243	77,180

Fuente: Autor

Durante los meses de mayor irradiación solar, como noviembre (4.59 HSP) y diciembre (4.20 HSP), la generación de energía aumenta considerablemente. En noviembre, el sistema alcanza 306.841 kWh, con un excedente de 100.651 kWh, mientras que en diciembre genera 290.243 kWh, con un excedente de 77.180 kWh. Estos resultados evidencian la capacidad del sistema para generar energía en cantidades suficientes no solo para satisfacer la demanda, sino también para producir excedentes significativos en los meses con mayor recurso solar.

3.11. Aprovechamiento del excedente energético

Si bien el sistema diseñado abastece al esquema de calentamiento de agua sanitaria, existe un excedente energético. El cual puede ser utilizado para que abastezca parte de la demanda eléctrica del edificio. Para lo cual, se hace uso de la demanda eléctrica total del edificio al mes, con lo cual se tiene un nuevo balance energético que se presenta en la Tabla 8.

Tabla 8. Balance energético considerando excedente de energía.

Mes	Días	HSP	Demanda Bomba de Calor (kWh)	Energía Generada (kWh)	Excedente Inicial (kWh)	Demanda Viviendas (kWh)	Nueva Demanda a restando el excedente (kWh)
Enero	31	4.14	213.06	286.44	73.38	297	223.62
Febrero	28	3.44	192.44	214.63	22.19	297	274.81
Marzo	31	3.15	213.06	218.06	5.00	297	292.00
Abril	30	3.14	206.19	210.16	3.97	297	293.03
Mayo	31	3.47	213.06	239.77	26.71	297	270.29
Junio	30	3.46	206.19	231.30	25.11	297	271.89
Julio	31	3.40	213.06	234.93	21.87	297	275.13
Agosto	31	3.40	213.06	234.73	21.66	297	275.34
Septiembre	30	3.40	206.19	227.62	21.43	297	275.57
Octubre	31	3.83	213.06	264.66	51.60	297	245.40
Noviembre	30	4.59	206.19	306.84	100.65	297	196.35
Diciembre	31	4.20	213.06	290.24	77.18	297	219.82
Total	365	-	2508.65	2969.52	460.87	3564	3103.13

Fuente: Autor

Al utilizar el excedente de energía se logra que el sistema trabaje utilizando toda su capacidad lo largo del año. Si bien la demanda de energía de las viviendas es 297 kWh, el excedente residual del sistema de calentamiento de ACS logra abastecer parte de dicha demanda.

4. CAPÍTULO 4

4.1. Análisis de resultados horarios

La Figura 32 obtenida muestra la relación entre el consumo de agua caliente sanitaria (ACS) y la energía eléctrica requerida por la bomba de calor a lo largo del día. Se observa un pico de consumo de ACS alrededor de las 5:00 a.m., alcanzando aproximadamente 0.35 m^3 . Este incremento genera la mayor demanda energética del sistema, superando los 3kWh en esa hora.

Después del pico matutino, el consumo de ACS disminuye y se mantiene en niveles bajos durante el resto de la mañana y la tarde. Sin embargo, entre las 15:00 y las 20:00 horas, se registran aumentos menores en la demanda de ACS, lo que genera requerimientos energéticos inferiores a 0.5 kWh.

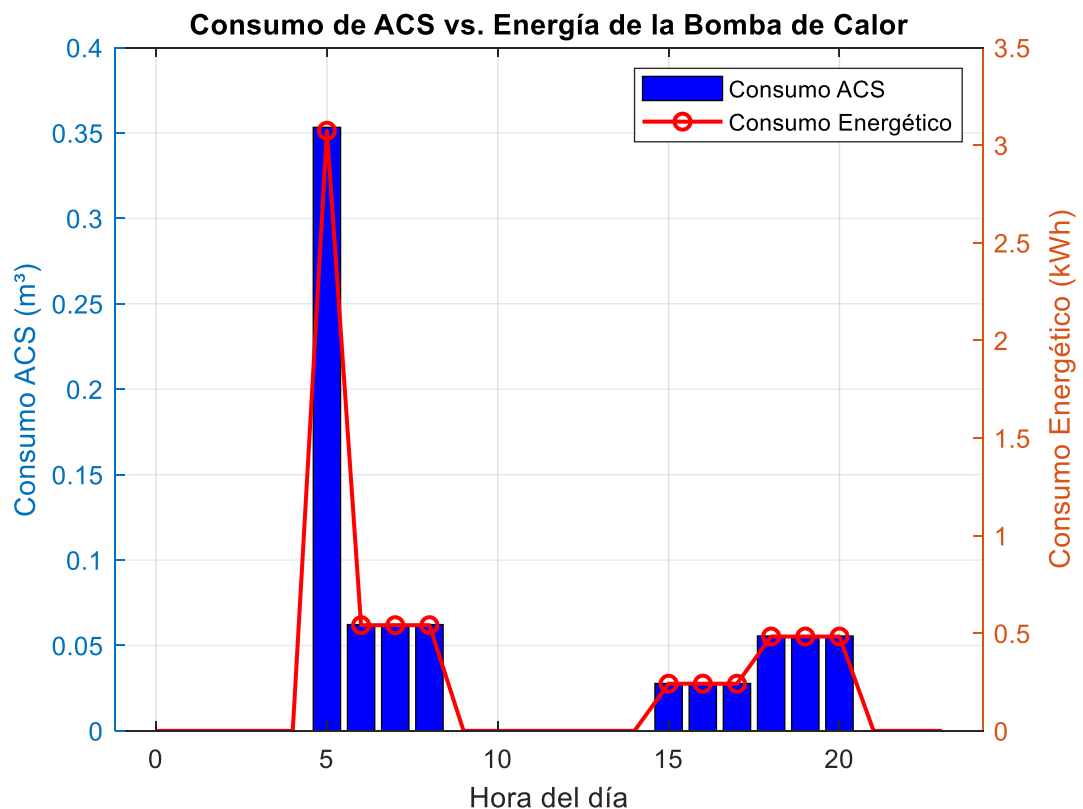


Figura 32. Energía requerida según comportamiento de ACS.

Fuente: Autor

Por su parte, la Figura 33 muestra la relación entre la energía consumida por la bomba de calor y la energía generada por el sistema fotovoltaico a lo largo del día. Se observa que el mayor consumo eléctrico ocurre a las 5:00 a.m., alcanzando aproximadamente 3.2 kWh en ausencia de generación solar. Esto resalta la importancia del tanque de la bomba de calor y

del tanque auxiliar como sistemas de almacenamiento térmico para garantizar el suministro de agua caliente en estos periodos.

La generación fotovoltaica inicia alrededor de las 7:00 a.m., alcanzando su punto máximo entre las 8:00 a.m. y las 3:00 p.m., con valores cercanos a 4.5 kWh. Durante este intervalo, la energía generada no solo cubre el consumo de la bomba de calor, sino que también permite calentar el agua almacenada para su uso posterior.

En la tarde, la generación disminuye progresivamente hasta cesar después de las 18:00. Mientras tanto, el consumo energético de la bomba de calor presenta picos menores entre las 18:00 y 21:00 horas, lo que refleja la demanda de agua caliente en horas nocturnas.

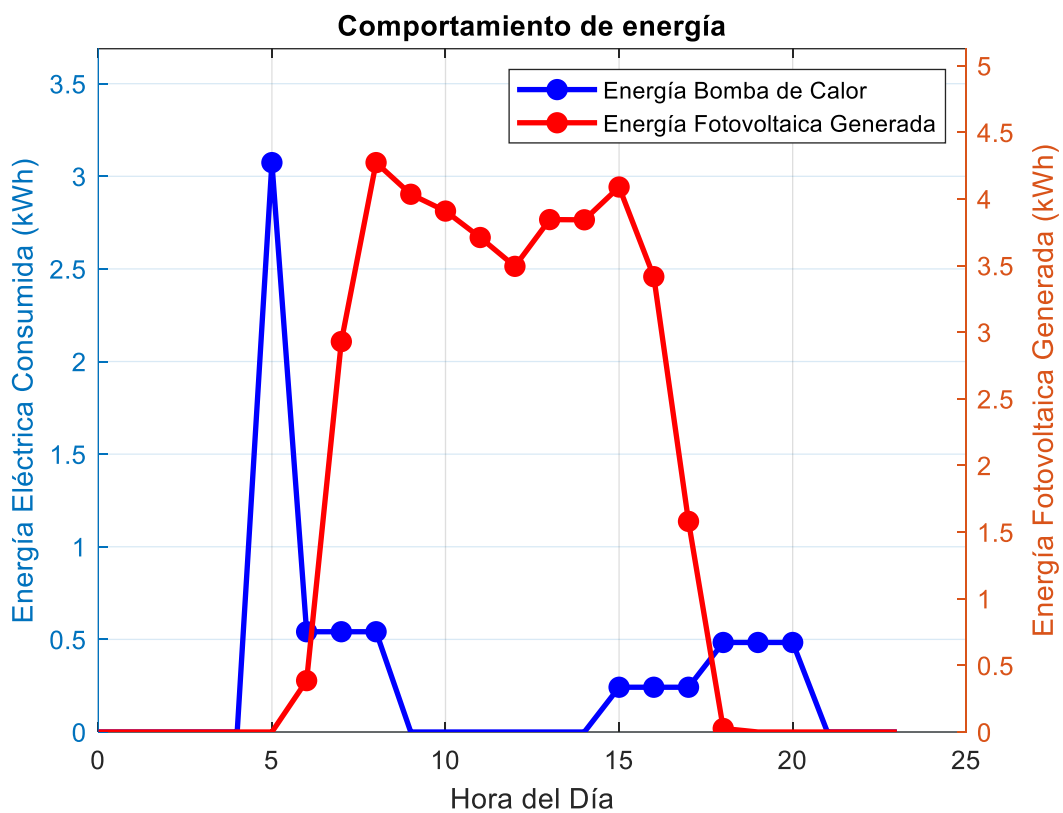


Figura 33. Energía demanda por la bomba de calor y energía generada por el sistema fotovoltaico.

Fuente: Autor

La Figura 34 revela la relación entre la energía térmica requerida por la bomba de calor y la potencia fotovoltaica generada a lo largo del día, considerando el almacenamiento en el tanque principal y el tanque auxiliar. Se observa que la mayor demanda térmica ocurre alrededor de las 5:00 a.m., alcanzando 12.5 kWh. En este horario, la ausencia de generación solar obliga al sistema a depender exclusivamente del almacenamiento térmico para el suministro de agua caliente.

A partir de las 7:00 a.m., la generación fotovoltaica inicia y alcanza su máximo entre las 8:00 a.m. y las 3:00 p.m. Durante este periodo, la bomba de calor opera para calentar el agua en el tanque principal, asegurando la disponibilidad térmica para las siguientes horas.

En la tarde, la demanda térmica presenta picos menores entre las 18:00 y las 21:00 horas. Estos requerimientos son cubiertos con el agua previamente calentada y almacenada, lo que confirma la efectividad del sistema de almacenamiento térmico.

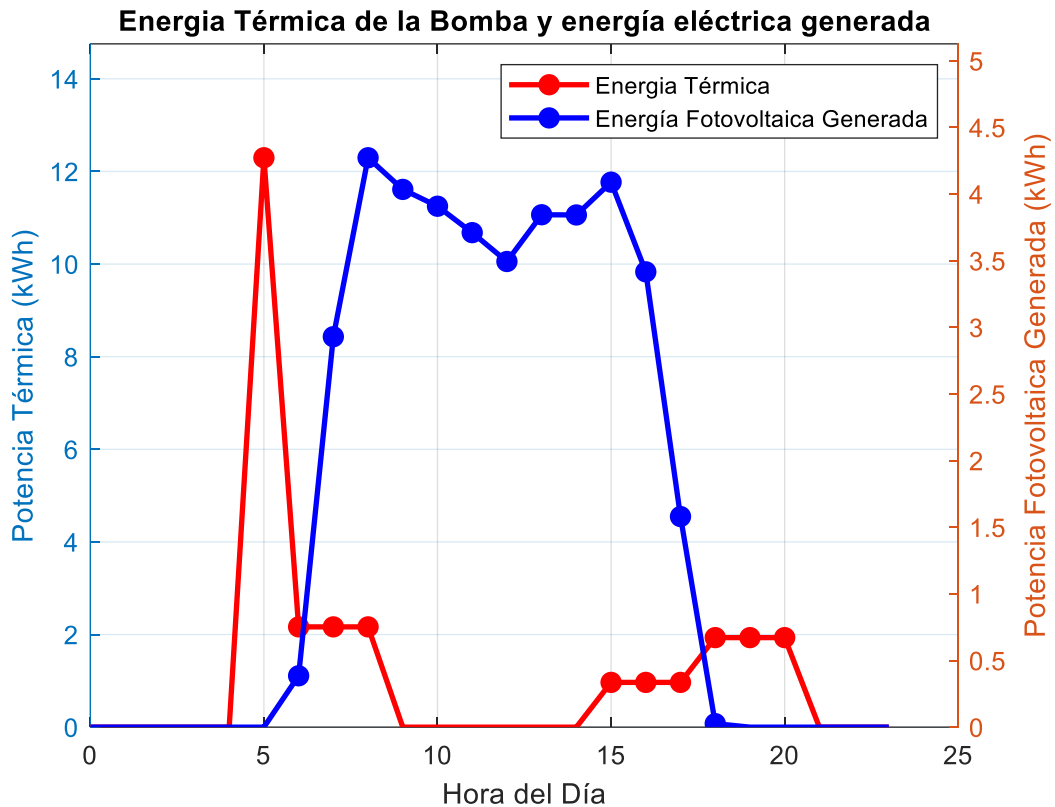


Figura 34. Potencia térmica necesaria y energía generada por el sistema fotovoltaico.

Fuente: Autor

La Figura 35 indica la variación de la temperatura en el tanque de la bomba de calor y en el tanque auxiliar a lo largo del día, en respuesta a la demanda de agua caliente sanitaria (ACS). Inicialmente, el tanque principal mantiene una temperatura estable cercana a 45°C, al igual que el tanque auxiliar.

A las 5:00 a.m., un consumo alto de ACS provoca una caída abrupta en la temperatura del tanque de la bomba de calor por debajo de 38°C, lo que activa el tanque auxiliar. Durante la transferencia de calor, la temperatura del tanque auxiliar disminuye hasta 14°C, mientras que el tanque principal inicia su recuperación progresiva. Una vez alcanzada la temperatura de operación, el tanque auxiliar deja de transferir calor y se estabiliza nuevamente.

En la tarde, se observan descensos en la temperatura del tanque principal debido al consumo de ACS. Sin embargo, estos no activan el tanque auxiliar, lo que indica que la bomba de calor mantiene el equilibrio térmico sin necesidad de respaldo adicional. El comportamiento confirma que el sistema gestiona eficientemente el almacenamiento térmico, utilizando el tanque auxiliar solo en condiciones críticas para garantizar un suministro continuo de agua caliente.

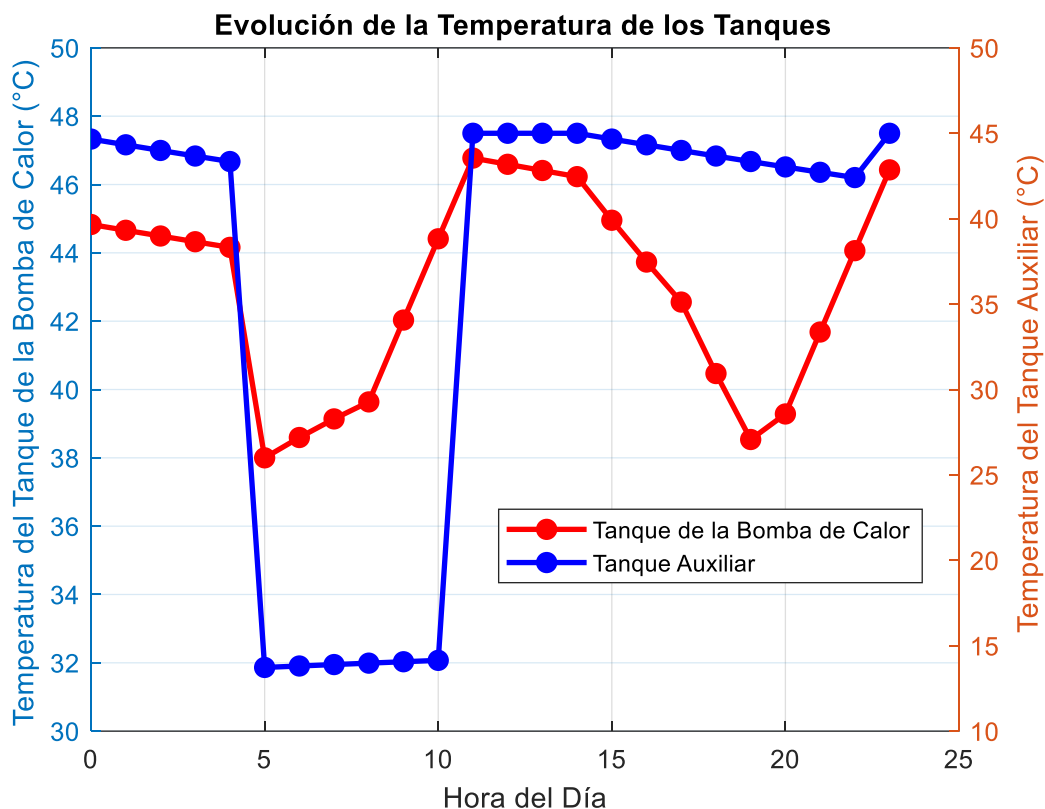


Figura 35. Comportamiento de la temperatura de los tanques con referencia a la ACS.

Fuente: Autor

4.2. Análisis de resultados mensuales

El desempeño del sistema fotovoltaico, como se presenta en la Figura 36, demuestra que la generación de energía excede de manera constante la demanda de la bomba de calor a lo largo del año.

Durante febrero y marzo, la generación fotovoltaica se aproxima al consumo debido a la reducción en la irradiación solar. No obstante, en noviembre y diciembre, la producción energética alcanza sus valores máximos, dando como resultado un excedente significativo. Esta variabilidad corresponde a las fluctuaciones estacionales en la radiación solar y las horas solares pico.

Es así como, estos resultados confirman que el sistema fotovoltaico es capaz de abastecer completamente la bomba de calor en cualquier mes del año. Además, los excedentes de energía pueden destinarse a otros usos o almacenarse.

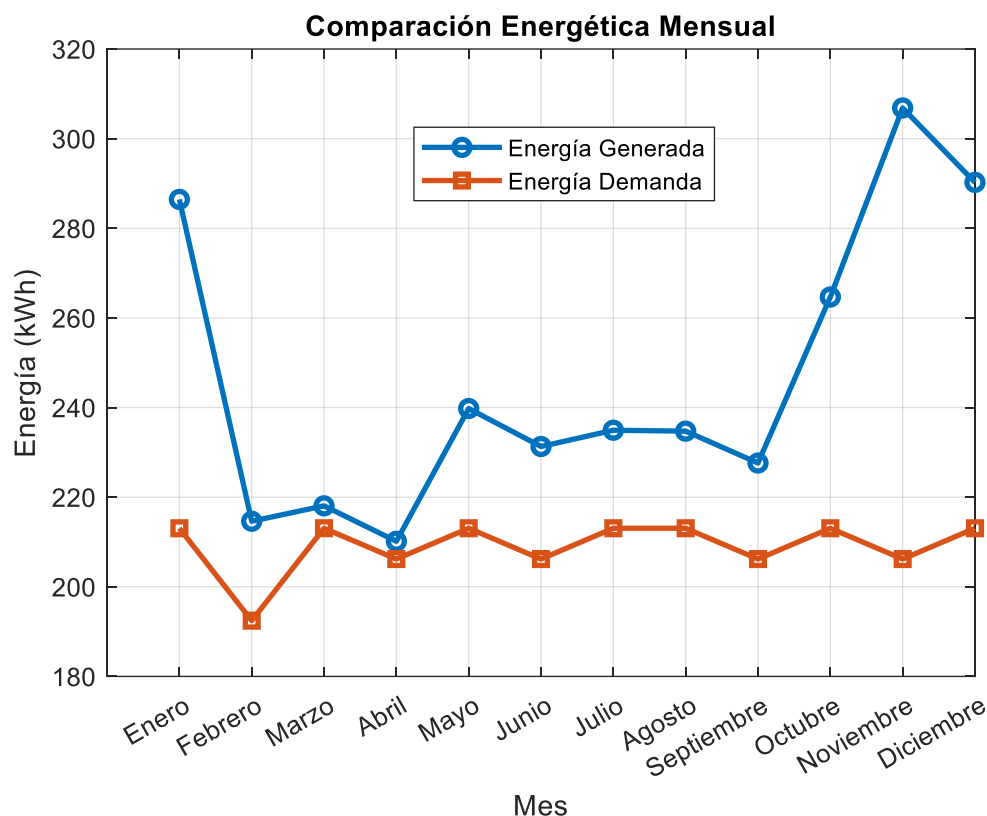


Figura 36. Comparativa de energía mensual demandada por la bomba de calor y la energía generada por el sistema fotovoltaico.

Fuente: Autor

Como se observa en la Figura 37, el suministro estable de ACS mediante la bomba de calor depende de la relación entre la energía generada por el sistema fotovoltaico, la demanda energética del sistema, las horas solares pico (HSP) y el consumo mensual de ACS. La generación fotovoltaica sigue directamente la variabilidad de las HSP, con una mayor producción en noviembre y diciembre, cuando la irradiación solar es más alta.

Por otro lado, durante febrero y marzo, la reducción de las HSP provoca una menor generación de energía, aunque la demanda de ACS se mantiene relativamente constante a lo largo del año. Esta estabilidad en el consumo implica que la demanda energética de la bomba de calor no presenta variaciones significativas, mientras que la generación de energía depende exclusivamente de la disponibilidad solar.

Los resultados obtenidos confirman que el diseño del sistema fotovoltaico es adecuado, ya que en la mayoría de los meses se genera suficiente energía para cubrir la demanda. Además, los excedentes obtenidos en los periodos de mayor irradiación pueden

destinarse a almacenamiento o respaldo energético, con la finalidad de optimizar el rendimiento del sistema.

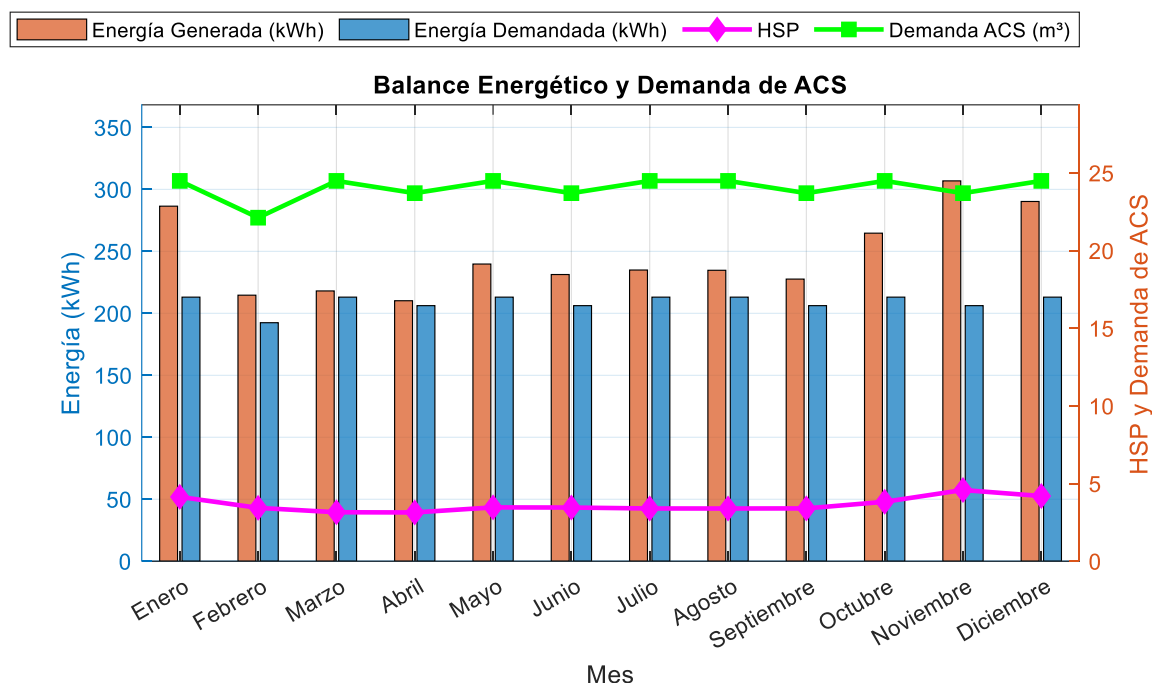


Figura 37. Balance energético mensual.

Fuente: Autor

4.3. Análisis económico

La evaluación económica de la implementación de una bomba de calor alimentada por energía solar fotovoltaica es necesaria para determinar la viabilidad del proyecto. Para ello, se analizan los costos iniciales de inversión, los costos operativos anuales, los ahorros en el consumo de energía y el retorno de inversión (ROI).

Este estudio permite estimar la rentabilidad del sistema a lo largo del tiempo y evaluar su impacto económico. Además, identifica los factores que pueden influir en su viabilidad, como la variabilidad en los costos de energía, el mantenimiento del sistema y la eficiencia de los equipos instalados.

4.3.1. Costos iniciales del sistema

La inversión inicial es un factor determinante en la evaluación económica del sistema de calentamiento de ACS mediante bomba de calor alimentada con energía fotovoltaica. Este costo incluye la adquisición de equipos, como la bomba de calor, los tanques de almacenamiento, los paneles fotovoltaicos, el inversor y el controlador. Además, contempla

los gastos asociados a la instalación, la mano de obra y los materiales complementarios. En la Tabla 9 se presentan los costos estimados de cada componente del sistema.

Tabla 9. Costo inicial del sistema de calentamiento de ACS con bomba de calor

Elemento	Cantidad	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
Bomba de calor 3kW	1	699	699
Tanque de almacenamiento ACS	1	1,200	1,200
Tanque auxiliar	1	800	800
Paneles fotovoltaicos (440 W)	24	105.60	2534.4
Inversor fotovoltaico	1	1,500	1,500
Controlador de carga	1	600	600
Sistema de montaje	1	1000	1000
Cableado y protecciones eléctricas	1	900	900
Mano de obra e instalación	-	-	2,500
Total	-	-	11,733

Fuente: Autor

La inversión total asciende a 11,733 USD, lo que representa un desembolso significativo. Este costo es característico de los sistemas fotovoltaicos híbridos con almacenamiento térmico.

4.3.2. Costos operativos anuales

Aunque el sistema fotovoltaico reduce el consumo de energía de la red eléctrica, su operación implica costos de mantenimiento. Estos incluyen el mantenimiento periódico de la bomba de calor, la inspección del sistema fotovoltaico y la revisión del sistema eléctrico para garantizar su correcto funcionamiento. En la Tabla 10 se presentan los costos de mantenimiento estimados.

Tabla 10. Costo operativos anuales del sistema de calentamiento de ACS con bomba de calor

Concepto	Costo Anual (USD)
Mantenimiento de la bomba de calor	50
Mantenimiento del sistema fotovoltaico	25
Revisión del sistema eléctrico	25
Total Costos Operativos Anuales	100

Fuente: Autor

El mantenimiento del sistema fotovoltaico incluye la limpieza periódica de los paneles, la revisión del inversor y el controlador. Asimismo, el mantenimiento de la bomba de calor es fundamental para preservar su eficiencia y prolongar su vida útil. Aunque estos costos son relativamente bajos en comparación con la inversión inicial, se deben considerar de forma obligatoria para el análisis financiero del sistema.

4.3.3. Ahorro en consumo de energía

Uno de los principales beneficios del sistema fotovoltaico es la reducción de los costos de electricidad. Para cuantificar este ahorro, se compara el costo de la electricidad sin el sistema fotovoltaico con el costo con el sistema en funcionamiento.

El consumo anual de energía de la bomba de calor es de 2,508.65 kWh/año. Considerando la tarifa de electricidad del sector residencial establecida por el Consejo Nacional de Electricidad (ARCONEL) en 2018, que es de 0.092 USD/kWh, el gasto anual de electricidad sin el sistema fotovoltaico se calcula mediante la Ecuación 26.

$$Costo_{sin\ FV} = 2508.65 * 0.092 = 230.80\ USD/año \quad (26)$$

Dado que el sistema fotovoltaico está diseñado para cubrir la totalidad de la demanda energética, el ahorro anual en consumo de energía es de 230.80 USD.

Como se evidenció en el balance energético, existe un excedente anual de 460.33 kWh, con lo cual se obtiene un ahorro de 42.35\$, como se presenta en la Ecuación 27.

$$Ahorro_{por\ excedente} = 460.33 * 0.092 = 42.35\ USD/año \quad (27)$$

De tal forma que el ahorro total se expone mediante la Ecuación 28.

$$Ahorro_{total} = 230.80 + 42.35 - 100 = 173.15\ USD/año \quad (28)$$

Este ahorro reduce significativamente la dependencia de la red eléctrica, mitigando el impacto de posibles aumentos en las tarifas de electricidad y mejorando la sostenibilidad energética del sistema. Sin embargo, para evaluar su viabilidad económica, es fundamental analizar este ahorro en relación con la inversión inicial y el período de retorno de inversión.

4.3.4. Cálculo del retorno de la inversión

Con el fin de determinar que el proyecto para el calentamiento del ACS se procede a realizar el cómputo y posterior análisis de los indicadores VAN y TIR. Para que el proyecto sea económicamente viable, el VAN debe adoptar un valor mayor a 0, mientras que, el TIR debe ser mayor a la tasa de descuento.

4.3.4.1. Cuantificación del VAN

La evaluación de la recuperación de una inversión requiere analizar los ahorros generados a lo largo del tiempo. Para ello, se emplea el Valor Actual Neto (VAN), una métrica que determina si el capital inicial es recuperable. Este indicador es fundamental para la toma de decisiones financieras.

El cálculo del VAN se basa en descontar los flujos de ahorro anual a valor presente, utilizando una tasa del 8%. Dicha tasa refleja el costo de oportunidad del capital, asegurando una evaluación financiera precisa. Este enfoque permite comparar inversiones de manera objetiva. Para lo cual, se emplea la Ecuación 29.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{A}{(1+r)^t} - I \quad (29)$$

Aquí,

A indica el ahorro anual (173.15 USD/año).

r corresponde a la tasa de descuento (0.08).

n muestra la vida útil del sistema (25 años).

I expone la inversión inicial (11733 USD).

Al reemplazar todos los valores mencionados se obtiene la Ecuación 30.

$$VAN = \sum_{t=1}^{25} \frac{173.15}{(1+0.08)^t} - 11733 = -9884.66 \text{ USD} \quad (30)$$

El resultado muestra una magnitud negativa del indicador VAN, lo cual indica que el proyecto no es viable.

4.3.4.2. Análisis del TIR

Para determinar la rentabilidad de un proyecto, es necesario calcular la tasa que iguala el VAN a cero. Esta tasa, denominada Tasa Interna de Retorno (TIR), representa la rentabilidad interna de la inversión. Su cálculo permite evaluar la viabilidad financiera del proyecto. La TIR se obtiene resolviendo la Ecuación 31.

$$0 = \sum_{t=1}^{25} \frac{173.15}{(1+TIR)^t} - 11733 = -6.65 \% \quad (31)$$

El valor resultante indica que la inversión no recupera su costo inicial y genera pérdidas a largo plazo.

5. CONCLUSIONES

El sistema de bomba de calor alimentado por energía fotovoltaica fue diseñado para cubrir la demanda térmica de ACS en el edificio seleccionado, garantizando un suministro estable mediante un campo solar de 24 paneles de 440 Wp. Sin embargo, el análisis económico reveló que la alta inversión inicial de \$11,733 USD, sumada al bajo costo de la electricidad residencial de \$0.092 USD/kWh, limita la viabilidad financiera del proyecto. Sin incentivos adicionales o reducción de costos, el retorno de inversión (ROI) no resulta favorable dentro del horizonte de análisis.

A partir del análisis del consumo de ACS, se determinó que la demanda energética anual de la bomba de calor es de 2,508.65 kWh, lo que equivale a una demanda térmica de 10,034.58 kWh/año, considerando un COP de 4. Para garantizar un almacenamiento adecuado de agua caliente, se dimensionó un tanque principal de 0.79 m³ y un tanque auxiliar de 0.19 m³, asegurando capacidad suficiente para los picos de consumo.

El sistema mantiene un COP de 4, lo que permite que la energía térmica generada sea cuatro veces superior a la energía eléctrica consumida. No obstante, la variabilidad en la irradiancia y el comportamiento del consumo de ACS ocasionaron que, en ciertos momentos del día, la temperatura del tanque de la bomba de calor descendiera por debajo de 38°C, activando el uso del tanque auxiliar. A pesar de estas fluctuaciones, la temperatura del agua se mantuvo dentro del rango óptimo para el suministro de ACS en la mayoría de las horas críticas.

La simulación del comportamiento térmico mostró que el tanque principal mantiene la temperatura estable durante la mayor parte del día. Sin embargo, en horarios de alta demanda (05:00 - 07:00 y 19:00 - 21:00), el sistema requiere el apoyo del tanque auxiliar para compensar la falta de generación térmica inmediata. Además, la correlación entre la generación fotovoltaica y el consumo energético de la bomba de calor evidencia la existencia de excedentes en ciertas horas del día.

El análisis financiero indicó que, a pesar del ahorro en el consumo de electricidad estimado fue de \$173.15 USD/año, los indicadores VAN y TIR no son favorables. Puesto que, el proyecto registra un VAN de -9884.66 USD. Un valor negativo, según los indicadores del banco central, menciona que el proyecto no es factible. Por otro lado, para constatarlo se cuantifico la TIR, misma que proporciona una magnitud de -6.55 %. Lo cual es un valor muy inferior a la tasa de descuento del 8%. Por lo tanto, el proyecto no es viable porque no se llega a recuperar la inversión en un periodo de 25 años, que es la vida útil del sistema de ACS propuesto. Finalmente, a pesar de no ser viable desde un punto de vista económico, este proyecto contribuye significativamente al cuidado del medio ambiente al reducir las emisiones

de gases de efecto invernadero, fomentar el uso de energías renovables y disminuir la dependencia de combustibles fósiles.

6. RECOMENDACIONES

Para mejorar la eficiencia y autosuficiencia del sistema, se recomienda implementar estrategias de optimización como el uso de baterías o la gestión de la demanda energética. Estas medidas permitirían maximizar el aprovechamiento de la energía generada y reducir la dependencia de la red eléctrica.

Para reducir la dependencia del tanque auxiliar, se recomienda aumentar ligeramente la capacidad del tanque principal de la bomba de calor o mejorar el aislamiento térmico del sistema de almacenamiento. Estas modificaciones minimizarían las pérdidas de calor y garantizarían una mayor estabilidad en la temperatura del agua durante los períodos de alta demanda.

Se sugiere implementar un sistema de control que regule el encendido y apagado de la bomba de calor en función de la disponibilidad de energía solar. Esto evitaría el uso innecesario del tanque auxiliar y optimizaría el consumo energético. Además, ajustar la cantidad de paneles fotovoltaicos o mejorar su orientación podría incrementar la eficiencia global del sistema.

Se recomienda explorar incentivos gubernamentales, tarifas diferenciadas de electricidad y posibles subvenciones para energías renovables con el fin de reducir el costo inicial del sistema. Asimismo, considerar modelos de negocio basados en generación distribuida o venta de excedentes energéticos podría mejorar la rentabilidad del proyecto a largo plazo.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abu-Rumman, M., Hamdan, M., & Ayadi, O. (2020). Performance enhancement of a photovoltaic thermal (PVT) and ground-source heat pump system. *Geothermics*, *85*, 101809. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101809>
- Acuna, J., Moncada, L., & Vasquez, P. (2016). Cooking and water heating with LPG or electricity — An economic assessment with policy issues. *2016 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition-Latin America (PES T&D-LA)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2016.7805682>
- Aguilar, Crespí, & Quiles. (2019). Experimental and numerical study of the domestic hot water production with PV panels and a heat pump. *E3S Web of Conferences*, *111*, 01066. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911101066>
- Aguilar, F., Crespí-Llorens, D., & Quiles, P. V. (2019). Environmental benefits and economic feasibility of a photovoltaic assisted heat pump water heater. *Solar Energy*, *193*, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.032>
- Allen, R., Svortevik, E., & Bergersen, H. (2023). *A Python-based code for modeling the thermodynamics of the vapor compression cycle applied to residential heat pumps*. 167–174. <https://doi.org/10.3384/ecp200022>
- Arenas-Larrañaga, M., Santos-Mugica, M., Alonso-Ojanguren, L., & Martin-Escudero, K. (2023). Energy and Cost Analysis of an Integrated Photovoltaic and Heat Pump Domestic System Considering Heating and Cooling Demands. *Energies*, *16*(13), 5156. <https://doi.org/10.3390/en16135156>
- Arroyo, F. R. M., & Miguel, L. J. (2020). The role of renewable energies for the sustainable energy governance and environmental policies for the mitigation of climate change in ecuador. *Energies*, *13*(15). <https://doi.org/10.3390/en13153883>
- Beccali, M., Leone, G., Zizzo, G., Bonomolo, M., Di Pietra, B., & Monteleone, F. (2019). Alternative Energy Storage Options for Heat Pump Water Heater Coupled with Photovoltaic Plant for Domestic Hot Water Production. *Proceedings of the ISES Solar World Congress 2019*, 1–11. <https://doi.org/10.18086/swc.2019.24.01>
- Besagni, G., Croci, L., Nesa, R., & Molinaroli, L. (2019). Field study of a novel solar-assisted dual-source multifunctional heat pump. *Renewable Energy*, *132*, 1185–1215. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.076>
- Biao, X., Tongyi, H., Lin, H., Yan, Y., Yuying, S., & Wei, W. (2019). Experimental study of an improved air-source heat pump system with a novel three-cylinder two-stage variable

- volume ratio rotary compressor. *International Journal of Refrigeration*, 100, 343–353.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.11.026>
- Cantor, J. (2020). Heat pumps for the home. In *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952. (Vol. 1, Issue April). The Crowood Press.
- Choi, H.-U., Kim, Y.-B., Son, C.-H., Yoon, J.-I., & Choi, K.-H. (2020). Experimental study on the performance of heat pump water heating system coupled with air type PV/T collector. *Applied Thermal Engineering*, 178, 115427.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115427>
- Cholewa, T., & Siuta-Olcha, A. (2021). On the use of residential thermal stations in different types of buildings. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(12), 14310–14318. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07632-8>
- Choudhary, P., & Srivastava, R. K. (2019). Sustainability perspectives- a review for solar photovoltaic trends and growth opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 227, 589–612. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.107>
- Clift, D. H., & Suehrcke, H. (2021). Control optimization of PV powered electric storage and heat pump water heaters. *Solar Energy*, 226, 489–500.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.08.059>
- Dragsted, J., Sifnaios, I., Jensen, A. R., Dannemand, M., & Dragsted, J. (2021). Demonstration of a Domestic Photovoltaic-Thermal (pvt)-Heat Pump System, Performance Simulation, and Economic Analysis for Different Climates. *Proceedings of the ISES Solar World Congress 2021*, 1–12. <https://doi.org/10.18086/swc.2021.26.03>
- DTU Wind Energy, & World Bank Group. (2024). *Global Wind Atlas*. Global Wind Atlas.
<https://globalwindatlas.info/es/>
- Efecto Solar. (2025). *Panel LONGI SOLAR Hi-MO X6 Max 615W*.
- EMOV. (2022). *Informe de la calidad del aire* (pp. 1–45).
- Fronius. (2022). *Fronius Symo Hybrid 5.0-3-S*. 0–1.
<https://www.fronius.com/de/solarenergie/installateure-partner/technische-daten/alle-produkte/wechselrichter/fronius-symo-hybrid/fronius-symo-hybrid-5-0-3-s>
- Fu, H., Li, G., & Li, F. (2019). Performance comparison of photovoltaic/thermal solar water heating systems with direct-coupled photovoltaic pump, traditional pump and natural circulation. *Renewable Energy*, 136, 463–472.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.028>
- Gafar, H. (2019). 1.8 MW rooftop solar photovoltaic power plant. *Bulletin of NTU “Kharkiv*

Polytechnic Institute” Series: Electrical Machines and Electromechanical Energy Conversion, 0(20 (1345)), 35–41. <https://doi.org/10.20998/2409-9295.2019.20.05>

- Gao, P., Chang, M.-M., Zhang, C.-L., & Shao, L.-L. (2019). System principles and applications of hybrid sorption–compression heat pump – A review. *International Journal of Refrigeration*, 108, 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.09.007>
- Habibi, M., & Hakkaki-Fard, A. (2019). Long-term energy and exergy analysis of heat pumps with different types of ground and air heat exchangers. *International Journal of Refrigeration*, 100, 414–433. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.02.021>
- Haegel, N. M., Atwater, H., Barnes, T., Breyer, C., Burrell, A., Chiang, Y.-M., De Wolf, S., Dimmler, B., Feldman, D., Glunz, S., Goldschmidt, J. C., Hochschild, D., Inzunza, R., Kaizuka, I., Kroposki, B., Kurtz, S., Leu, S., Margolis, R., Matsubara, K., ... Bett, A. W. (2019). Terawatt-scale photovoltaics: Transform global energy. *Science*, 364(6443), 836–838. <https://doi.org/10.1126/science.aaw1845>
- Hamburg, A., Mikola, A., Parts, T. M., & Kalamees, T. (2021). Heat loss due to domestic hot water pipes. *Energies*, 14(20), 1–19. <https://doi.org/10.3390/en14206446>
- Heidari, A., Marechal, F., & Khovalyg, D. (2021). An adaptive control framework based on Reinforcement learning to balance energy, comfort and hygiene in heat pump water heating systems. *Journal of Physics: Conference Series*, 2042(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2042/1/012006>
- Ismael, M. A., Yahya, S. G., & Azzawi, I. D. J. (2022). Experimental Investigation of Performance of Conventional Vapor Compression Refrigeration Cycle Using Geothermal Cooling in Extreme Hot Weather Conditions. *International Journal of Heat and Technology*, 40(2), 449–456. <https://doi.org/10.18280/ijht.400212>
- James, A. J., Jayaraj, S., Srinivas, M., & Mohanraj, M. (2021). Energy-Efficient Operation of PV-T Solar Collectors with Heat Pump based Water Heaters Suitable for Domestic Applications. *International Journal of Mathematics and Physics*, 12(1). <https://doi.org/10.26577/ijmph.2021.v12.i1.02>
- Knuutinen, J., Böök, H., Ruuskanen, V., Kosonen, A., Immonen, P., & Ahola, J. (2021). Ground source heat pump control methods for solar photovoltaic-assisted domestic hot water heating. *Renewable Energy*, 177, 732–742. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.139>
- Kordana-Obuch, S., Starzec, M., & Słyś, D. (2021). Assessment of the Feasibility of Implementing Shower Heat Exchangers in Residential Buildings Based on Users’ Energy Saving Preferences. *Energies*, 14(17), 5547.

<https://doi.org/10.3390/en14175547>

- Li, H., & Sun, Y. (2019). Performance optimization and benefit analyses of a photovoltaic loop heat pipe/solar assisted heat pump water heating system. *Renewable Energy*, *134*, 1240–1247. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.055>
- Liu, C., Zhang, X., & Zhao, S. (2023). Experimental Study of Photovoltaic-thermal Integrated Heat Pump Building Heating System. *Journal of Physics: Conference Series*, *2584*(1), 012039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2584/1/012039>
- Liu, J., Lu, Y., Tian, X., Niu, J., & Lin, Z. (2021). Performance analysis of a dual temperature heat pump based on ejector-vapor compression cycle. *Energy and Buildings*, *248*, 111194. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111194>
- Liu, W. (2023). Key technologies for photovoltaic power generation. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, *43*, 74–83. <https://doi.org/10.54097/hset.v43i.7407>
- Liu, Y., Hang, C., Zhang, H., Xu, D., & Pan, G. (2023). Dynamic Analysis of Heat Pump Assisted Photovoltaic/Thermal Cogeneration System. *2023 International Conference on Power Energy Systems and Applications (ICoPESA)*, 643–647. <https://doi.org/10.1109/ICoPESA56898.2023.10141306>
- Longo, G. A., Mancin, S., Righetti, G., Zilio, C., & Steven Brown, J. (2020). Assessment of the low-GWP refrigerants R600a, R1234ze(Z) and R1233zd(E) for heat pump and organic Rankine cycle applications. *Applied Thermal Engineering*, *167*, 114804. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114804>
- Lorenzo, C., & Narvarte, L. (2019). Performance indicators of photovoltaic heat-pumps. *Heliyon*, *5*(10), e02691. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02691>
- Mahdi, M. M., & Gaddoa, A. (2020). *An Experimental Study on Optimization of a Photovoltaic Solar Pumping System Used for Solar Domestic Hot Water System Under Iraqi Climate* (pp. 717–725). https://doi.org/10.1007/978-981-15-2780-7_78
- Malić, L., Paunović, A., Milovančević, U., & Otović, M. (2020). Air-to-Water Heat Pump Operation Analysis. *Proceedings of the 51st International HVAC&R Congress and Exhibition*, 31–35. <https://doi.org/10.24094/kgkh.020.51.1.31>
- Martorana, F., Bonomolo, M., Leone, G., Monteleone, F., Zizzo, G., & Beccali, M. (2021). Solar-assisted heat pumps systems for domestic hot water production in small energy communities. *Solar Energy*, *217*, 113–133. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.020>
- Maslikova, S. V., Krotov, A. S., Kosenko, G. M., & Maziakin, M. S. (2023). Range of application of heat pump systems on various natural refrigerants. *Refrigeration*

Technology. <https://doi.org/10.17816/rf490662>

- Mateu-Royo, C., Arpagaus, C., Mota-Babiloni, A., Navarro-Esbrí, J., & Bertsch, S. S. (2021). Advanced high temperature heat pump configurations using low GWP refrigerants for industrial waste heat recovery: A comprehensive study. *Energy Conversion and Management*, 229, 113752. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113752>
- Meng, Z., Junqi, Y., & Anjun, Z. (2022). Distributed model predictive control for central heating of high-rise residential buildings. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 21(6), 2580–2592. <https://doi.org/10.1080/13467581.2021.1987245>
- Morales, A. C., & Sauer, I. L. (2001). Mitigation of greenhouse gas emissions originating from energy consumption by the residential sector in Ecuador. *Energy for Sustainable Development*, 5(3), 47–59. [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60276-8](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60276-8)
- NASA. (2024). *NASA POWER*. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Obalanlege, M. A., Mahmoudi, Y., Douglas, R., Ebrahimnia-Bajestan, E., Davidson, J., & Bailie, D. (2020). Performance assessment of a hybrid photovoltaic-thermal and heat pump system for solar heating and electricity. *Renewable Energy*, 148, 558–572. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.061>
- Öztürk, M., Çalışır, O., & Genç, G. (2021). Energy, exergy and economic (3E) evaluation of the photovoltaic/thermal collector-assisted heat pump domestic water heating system for different climatic regions in Turkey. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 145(3), 1431–1443. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10675-9>
- Panagiotidou, M., Aye, L., & Rismanchi, B. (2020). Solar driven water heating systems for medium-rise residential buildings in urban mediterranean areas. *Renewable Energy*, 147, 556–569. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.020>
- Peñafiel, C. (2024). *Diseño y simulación de un sistema híbrido eólico/fotovoltaico para alumbrado público en vías rápidas. Caso de estudio vía Cuenca-Azoguez* [Universidad Católica de Cuenca]. <https://dspace.ucacue.edu.ec/bitstreams/69192266-8b45-4176-a334-84b60fc071fb/download>
- Pesántez, J. (2007). Reducción de costos en el calentamiento de agua en Ecuador , a través de la sustitución de calefones con uso de GLP por sistemas de energía solar térmica Jimmy Pesántez Encalada - Escuela de Ingeniería Industrial - Facultad de Ingeniería Industrial. *Universidad Estatal Península de Santa Elena, año, 0–4*.
- Ratajczak, K., Michalak, K., Narojczyk, M., & Amanowicz, Ł. (2021). Real Domestic Hot Water Consumption in Residential Buildings and Its Impact on Buildings' Energy

- Performance—Case Study in Poland. *Energies*, 14(16), 5010.
<https://doi.org/10.3390/en14165010>
- Riaz, A., Zhou, C., Mubin, S., Ali, F., Pie, B., Liang, R., Wang, P., & Zhang, J. (2023). Performance evaluation of façade mounted photovoltaic integrated air chamber assisted by heat pump. *Energy & Environment*, 34(8), 3187–3203.
<https://doi.org/10.1177/0958305X221120932>
- Rony, R. U., Yang, H., Krishnan, S., & Song, J. (2019). Recent advances in transcritical CO₂ (R744) heat pump system: A review. In *Energies* (Vol. 12, Issue 3).
<https://doi.org/10.3390/en12030457>
- Sakellariou, E. I., & Axaopoulos, P. J. (2020). Energy performance indexes for solar assisted ground source heat pump systems with photovoltaic-thermal collectors. *Applied Energy*, 272, 115241. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115241>
- Samarin, O. D. (2020). Analysis of reliable and safe heat supply of residential buildings using waste water after DHW heat exchangers. *Safety and Reliability of Power Industry*, 13(1), 41–47. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-1-41-47>
- Sezen, K. (2023). Performance analysis of a novel solar assisted air source heat pump. *International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences*, 1(1), 679–681.
<https://doi.org/10.59287/icaens.1079>
- Suárez, G. (2015). "Simulación de un Sistema de Bomba de Calor para el Calentamiento de Agua en Aplicaciones Domésticas y su Integración con Tecnologías de Almacenamiento de Energía Térmica. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Sun, J., Wang, Y., Wu, K., Ge, Z., & Yang, Y. (2022). Analysis of a New Super High Temperature Hybrid Absorption-Compression Heat Pump Cycle. *Energies*, 15(20), 7515. <https://doi.org/10.3390/en15207515>
- SunFields. (2025). *SunPower Maxeon 3 | Panel solar 400W | Distribuidor Oficial*.
<https://www.sfe-solar.com/instalaciones-fotovoltaicas/productos/paneles-solares/sunpower/maxeon-3-430w/>
- Sward, J. A., Siff, J., Gu, J., & Zhang, K. M. (2019). Strategic planning for utility-scale solar photovoltaic development – Historical peak events revisited. *Applied Energy*, 250, 1292–1301. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.178>
- Tello Oquendo, F. M. (2019). *Study of scroll compressors with vapor-injection for heat pumps operating in cold climates or in high-temperature water heating applications* [Universitat Politècnica de València]. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/120473>

- Vaishak, S., & Bhale, P. V. (2019). Photovoltaic/thermal-solar assisted heat pump system: Current status and future prospects. *Solar Energy*, *189*, 268–284. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.07.051>
- Vaishak, S., & Bhale, P. V. (2021). Performance analysis of a heat pump-based photovoltaic/thermal (PV/T) system. *Clean Technologies and Environmental Policy*, *23*(4), 1121–1133. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01839-6>
- Wilson, G. M., Al-Jassim, M., Metzger, W. K., Glunz, S. W., Verlinden, P., Xiong, G., Mansfield, L. M., Stanbery, B. J., Zhu, K., Yan, Y., Berry, J. J., Ptak, A. J., Dimroth, F., Kayes, B. M., Tamboli, A. C., Peibst, R., Catchpole, K., Reese, M. O., Klinga, C. S., ... Sulas-Kern, D. B. (2020). The 2020 photovoltaic technologies roadmap. *Journal of Physics D: Applied Physics*, *53*(49). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab9c6a>
- Wu, D., Jiang, J., Hu, B., & Wang, R. Z. (2020). Experimental investigation on the performance of a very high temperature heat pump with water refrigerant. *Energy*, *190*, 116427. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116427>
- Wu, H., Shan, S., & Zhou, Z. (2023). Performance analysis of a novel solar radiation cascade conversion system for combined heat and power generation based on spectrum splitting and reshaping. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, *15*(3). <https://doi.org/10.1063/5.0145302>
- Yeom, G., Jung, D. E., & Do, S. L. (2019). Improving a Heating Supply Water Temperature Control for Radiant Floor Heating Systems in Korean High-Rise Residential Buildings. *Sustainability*, *11*(14), 3926. <https://doi.org/10.3390/su11143926>
- Zhou, C., Liang, R., Riaz, A., Zhang, J., & Chen, J. (2019). Experimental investigation on the tri-generation performance of roll-bond photovoltaic thermal heat pump system during summer. *Energy Conversion and Management*, *184*, 91–106. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.028>
- Zhou, C., Riaz, A., Wang, J., Zhang, J., & Xu, L. (2023). Photovoltaic Thermal Heat Pump Assessment for Power and Domestic Hot Water Generation. *Energies*, *16*(19), 6984. <https://doi.org/10.3390/en16196984>
- Zhu, Y., Li, W., Wang, Y., Li, H., & Li, S. (2021). Thermodynamic analysis and parametric optimization of ejector heat pump integrated with organic Rankine cycle combined cooling, heating and power system using zeotropic mixtures. *Applied Thermal Engineering*, *194*, 117097. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117097>

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, Mario Francisco Loayza Roman portador de la cédula de ciudadanía N.º 0706330628. En calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación “EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LA BOMBA DE CALOR ALIMENTADA POR ENERGÍA FOTOVOLTAICA PARA EL CALENTAMIENTO DE AGUA” de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 12 de marzo de 2025

F: 

Mario Francisco Loayza Roman

0706330628