



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE MECÁNICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CALENTADOR SOLAR
DE TUBOS DE VACÍO CON UNA CAPACIDAD DE 150 L/DÍA
DE AGUA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Mecánico

AUTOR: BRYAN PAÚL MARTÍNEZ LARA

TUTOR: WILLIAM GIOVANNY QUITIAQUEZ SARZOSA

Quito – Ecuador

2025

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, BRYAN PAÚL MARTÍNEZ LARA con documento de identificación N° 1715724561, manifiesto que:

Soy autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 14 de febrero de 2025

Atentamente



.....

Bryan Paúl Martínez Lara

1715724561

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Bryan Paúl Martínez Lara con documento de identificación No. 1715724561 expreso mi voluntad por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor de la Propuesta tecnológica: “Diseño y construcción de un calentador solar de tubos de vacío con una capacidad de 150 L/día de agua”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 14 de febrero de 2025

Atentamente



.....
Bryan Paúl Martínez Lara

1715724561

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, William Giovanni Quitiaquez Sarzosa con documento de identidad N° 1721609764 docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CALENTADOR SOLAR DE TUBOS DE VACÍO CON UNA CAPACIDAD DE 150 L/DÍA DE AGUA, realizado por Bryan Paúl Martínez Lara con documento de identificación N° 1715724561, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Propuesta Tecnológica que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 14 de febrero de 2025

Atentamente

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Ing. William Quitiaquez Sarzosa', is written over a horizontal dotted line.

Ing. William Giovanni Quitiaquez Sarzosa, PhD.

1721609764

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que, de manera directa o indirecta, han contribuido al desarrollo de esta tesis y a mi formación profesional durante mi paso por la carrera de Ingeniería Mecánica.

En primer lugar, agradezco profundamente a mi tutor, el Dr. William Quitiaquez, por su apoyo incondicional, su valiosa orientación y el seguimiento constante a lo largo de todo el proceso de investigación. Su conocimiento y dedicación fueron fundamentales para el logro de este trabajo.

A esta prestigiosa institución, que me abrió las puertas de sus aulas y laboratorios, permitiéndome crecer tanto a nivel académico como profesional. Gracias por brindarme las herramientas necesarias para afrontar los retos que se me presentaron a lo largo de estos años. Mi agradecimiento también va dirigido a cada uno de los docentes que me acompañaron a lo largo de mi vida universitaria. Cada uno de ustedes, con su enseñanza y dedicación, ha contribuido al desarrollo de mis conocimientos y habilidades, brindándome una sólida formación que hoy me permite culminar este importante proyecto.

A mis compañeros y amigos, quienes, con su apoyo y compañerismo, hicieron de este proceso un camino más llevadero. Gracias por estar siempre presentes en los momentos difíciles y por compartir, con entusiasmo, las experiencias que nos formaron como profesionales y seres humanos.

Finalmente, quiero dedicar mis más profundos agradecimientos a mi familia. Gracias por su amor incondicional, por ser mi apoyo constante y por darme la fuerza necesaria para superar los momentos de duda. Sin su respaldo, no hubiera sido posible llegar a culminar esta maravillosa etapa de mi vida.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento.

DEDICATORIA

A Dios, quien en todo momento ha sido mi refugio, mi fortaleza y mi guía. Gracias por no abandonarme nunca, por cuidar de mí en cada paso y darme las fuerzas necesarias para alcanzar este logro.

A mis padres, Jairo y Sonia, cuya entrega y amor incondicional me han inspirado desde siempre. Su apoyo, comprensión y fe en mí han sido mi mayor motor. Gracias por enseñarme que los desafíos de la vida pueden enfrentarse con valentía y que todo es posible cuando se lucha con determinación.

A mis hermanos, Miriam y Ronald, mis cómplices y compañeros de vida. Sus palabras de ánimo, su confianza y su amor me han sostenido en los momentos más difíciles. Los amo con todo mi ser y siempre llevaré su apoyo en mi corazón.

A toda mi familia, que nunca dejó de preguntar cómo iba en este camino, recordándome que no estaba solo y llenándome de cariño y motivación. Cada palabra y gesto suyo han sido parte de este triunfo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE ANEXOS	XI
RESUMEN.....	XII
ABSTRACT	XIII
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
CAPÍTULO I FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE CALENTADORES DE AGUA.....	3
1.1 Revisión del estado del arte	3
1.2 Energía solar	5
1.3 Aplicaciones relacionadas a energía proveniente del sol	7
1.4 Sistemas de calentamiento de agua	8
1.4.1 Sistema pasivo, termosifón, directo	9
1.4.2 Sistema activo, circuito abierto, bombeado directo	9
1.4.3 Sistema activo, circuito cerrado (anticongelante), indirecto	9
1.4.4 Bomba de calor	10
1.4.5 Colector solar de placa plana	10
1.4.6 Tubo de calor	10
1.5 Colectores de tubos de vacío	10
1.6 Criterios de diseño	11
1.7 Materiales	12
1.8 Comparación con otros sistemas	12
1.9 Eficiencia energética.....	14
1.10 Impacto ambiental	15
CAPÍTULO II DESARROLLO METODOLÓGICO DE LA PROPUESTA	17
2.1 Enfoque metodológico.....	17

2.2	Primera ley de la termodinámica	17
2.3	Ecuación de conservación de la energía	17
2.4	Radiación solar	17
2.5	Energía solar recibida	18
2.6	Energía térmica transferida al agua	19
2.7	Pérdidas térmicas de energía	19
2.8	Coefficiente global de transferencia de calor.....	19
2.9	Eficiencia del colector solar	20
2.10	Tiempo de calentamiento.....	20
2.11	Transferencia de calor en los tubos de vacío	21
2.12	Número de tubos de vacío	22
2.13	Análisis numérico del sistema	22
CAPÍTULO III ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		26
3.1	Estimación del requerimiento de agua caliente	26
3.2	Descripción del equipo	26
3.3	Medición de condiciones climáticas.....	28
3.4	Proceso de calentamiento	30
CAPÍTULO IV ANÁLISIS ECONÓMICO		34
4.1	Costos de los componentes.....	34
4.2	Comparativa entre sistemas de calentamiento de agua	34
4.3	Valor actual neto y tasa interna de retorno	35
CONCLUSIONES		37
RECOMENDACIONES		39
BIBLIOGRAFÍA.....		40
ANEXOS.....		46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Energía solar térmica	6
Figura 2. Espectros de radiación solar	7
Figura 3. Fuentes energéticas utilizadas en el calentamiento de agua	8
Figura 4. Partes del colector solar plano.	13
Figura 5. Colector de tubos de vacío.....	13
Figura 6. Colectores de concentración.	14
Figura 7. Estimación del calor transferido por conducción en la tubería.....	23
Figura 8. Estimación de pérdidas de calor utilizando aislantes.	25
Figura 9. Sistema de tipo CSTV.	28
Figura 10. Radiación solar respecto al tiempo.	30
Figura 11. Temperatura del agua en el tanque respecto al tiempo.....	31
Figura 12. Temperatura del agua almacenada respecto a radiación.....	32
Figura 13. Calor absorbido por el agua respecto a la radiación.	32
Figura 14. Eficiencia del colector respecto a la radiación.....	33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Materiales de tuberías comerciales	23
Tabla 2. Materiales aislantes	24
Tabla 3. Componentes del sistema	26
Tabla 4. Condiciones ambientales en Quito 2023	29
Tabla 5. Temperatura superficial alrededor del colector solar [°C].	29
Tabla 6. Temperatura superficial del colector solar [°C].	29
Tabla 7. Temperatura del agua caliente almacenada [°C].	30
Tabla 8. Costos de los componentes del sistema.....	34

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Proceso de construcción	46
--	----

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo diseñar, validar y evaluar la viabilidad de un calentador solar para 150 L de agua, adaptado a las condiciones climáticas de Ecuador. Se identificaron las características de los calentadores solares, destacando su eficiencia para aprovechar la radiación solar y alcanzar temperaturas superiores a 40 °C. El diseño del tanque de almacenamiento y la tubería se realizó mediante software *Engineering Equation Solver* (EES), permitiendo analizar el calor transferido para reducir pérdidas térmicas mediante el uso de materiales adecuados, como cobre, PVC y fibra de vidrio. Durante las pruebas, el sistema logró temperaturas promedio de 41.55, 48.02, 49.49 y 49.98 °C, superando el rango esperado y demostrando su efectividad. La eficiencia promedio del colector solar fue de hasta 58.3 %, reflejando un desempeño correcto para convertir radiación solar en calor. En términos económicos, el análisis financiero evidenció la viabilidad del proyecto, con un VAN de USD 156.52 y una TIR del 12 %, valores más altos a la tasa de descuento del 8 %. El ahorro anual estimado de USD 150 respalda la rentabilidad y sostenibilidad de la inversión.

Palabras clave: Colector solar, agua caliente sanitaria, eficiencia energética, diseño térmico

ABSTRACT

This research aims to design, validate, and assess the viability of a 150-liter solar water heating system, according to Ecuador's climatic conditions. The main characteristics of solar water heaters were identified, emphasizing their efficiency in harnessing solar radiation to achieve temperatures exceeding 40 °C. The design of the storage tank and piping was conducted using Engineering Equation Solver (EES) software, enabling detailed heat transfer analysis and minimizing thermal losses using suitable materials such as copper, PVC, and fiberglass. During testing, the system achieved average water temperatures of 41.55, 48.02, 49.49, and 49.98 °C, surpassing expected ranges and demonstrating high effectiveness. The solar collector's average efficiency reached 58.3 %, reflecting reliable performance in generating heat through solar radiation. Economically, the financial analysis showed the feasibility of the project, with an NPV of USD 156.52 and an IRR of 12%, exceeding the 8% discount rate. An estimated annual savings of USD 150 further reinforce the system's profitability and long-term sustainability as an energy-efficient solution.

Keywords: Solar collector, domestic hot water, energy efficiency, thermal design.

INTRODUCCIÓN

En el transcurso del tiempo el uso de los recursos renovables ha cobrado una relevancia importante debido al aumento de la contaminación provocada por la industrialización, especialmente por la quema de combustibles fósiles contribuyendo al cambio climático, efecto invernadero y el desgaste de la capa de ozono. En este contexto, el país tiene como principales fuentes de energía para el calentamiento de agua, como los calefones los cuales operan con bombonas de propano y butano, así como las duchas eléctricas. Esta situación destaca la necesidad de desarrollar otras alternativas como los calentadores solares estos que no solo sean eficientes y seguros, sino que también tengan un bajo impacto ambiental [1]. Los calentadores de agua solares representan una alternativa eficaz en la lucha contra la contaminación generada por los calentadores tradicionales, que utilizan gas licuado de petróleo (GLP) o diésel.

Este sistema de calentador mantiene una única fuente de energía que es la solar, la cual es considerada inagotable y gratuita. La eficiencia de este sistema varía según la ubicación geográfica, ya que en un área de mayor radiación solar incrementa el rendimiento del calentador. [2]. El calentador solar de agua para uso doméstico se presenta como alternativa para reemplazar los calentadores tradicionales; una opción más viable considerando que la temperatura requerida oscila entre los 40 y 60°C. Desde la perspectiva del ahorro energético es la opción más beneficiosa, dado a que solo se utiliza radiación solar como única fuente de calor, de tal manera que se elimina la necesidad del uso de combustibles fósiles o eléctricos [3].

Al conocer la necesidad de implementar nuevos recursos naturales, el presente plan de propuesta tecnológica de titulación tiene como objetivo el desarrollo de un calentador de agua solar, detallando su diseño, construcción que opera con circulación natural, la cual se genera gracias al principio de termosifón [4]. El plan explica el empleo de tecnologías ecológicas y fuentes de energía renovables que aminoren la generación de contaminación y tengan un menor impacto ambiental. Esto resalta la importancia de adaptar soluciones sustentables con el fin de favorecer la preservación del entorno natural y contribuir al desarrollo energético del país [6].

OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un calentador solar de tubos de vacío con una capacidad de 150 L/día de agua.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las características principales de los diferentes tipos de calentadores de agua que utilizan energía solar para su funcionamiento.
- Diseñar el tanque de almacenamiento y la tubería del calentador de agua solar mediante software de diseño mecánico.
- Validar el funcionamiento del calentador de agua considerando que alcance una temperatura entre 35 y 40 °C.
- Evaluar la viabilidad financiera de la implementación del proyecto.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE CALENTADORES DE AGUA

1.1 Revisión del estado del arte

Abdul-Ghafoor [1] menciona que, desarrollaron un estudio para optimizar la eficiencia de sistemas solares de agua con tubos al vacío (CSTV) mediante un análisis de factores como el tipo de fluido, flujo de masa y el uso de espejos reflectores para una mejor incidencia y recepción de radiación solar. En particular, el análisis se centró en la mejora del rendimiento térmico mediante la inclusión de reflectores laterales alrededor de los tubos, ajustando el ángulo de inclinación y el ancho de los espejos para maximizar la temperatura alcanzada. Los resultados indicaron que una inclinación de 30° y un ancho de espejos de 500 mm optimizan la captación solar, alcanzando una eficiencia térmica del 84 % al mediodía, con una irradiancia de hasta 700 W/m^2 . Se destaca la contribución de un enfoque innovador al diseño de calentadores solares, incrementando su efectividad a través de ajustes en la infraestructura reflectiva y el control de flujo.

Según Piselli et al. [2] desarrollaron el modelamiento numérico tridimensional transitorio para simular la disipación de calor nocturna en CSTV, complementado con experimentos para medir la caída de temperatura en condiciones nocturnas y de clima frío. Los resultados experimentales y de simulación revelaron que, durante noches frías y despejadas, estos calentadores experimentan problemas de congelación, especialmente desde la base de los tubos de vacío, con longitudes de congelación de hasta 1180 mm y grosores de hielo de hasta 5 mm en la sección inferior. En la ausencia de un tanque de almacenamiento, aproximadamente 4/5 de los tubos individuales se congelaron completamente. Sin embargo, al incrementar el volumen del tanque a 15 L, se observó una reducción en la caída de temperatura en el tanque y en los tubos de vacío del 12.1 y 7.6 %, respectivamente, disminuyendo significativamente el riesgo de congelación.

Shaaban [3] dice que se investigó la manera de mejorar la eficiencia de colectores parabólicos con la mejora del perfil de sus espejos reflectantes. Al aplicar un método de optimización multidimensional y multiobjetivo, se desarrollaron dos perfiles óptimos, que maximizaron la irradiancia solar reflejada hacia el tubo receptor. Los resultados muestran que el perfil 1

incrementa la eficiencia global del colector en un 8.2 % en comparación con un colector parabólico estándar. Además, el diseño del perfil 1 permite una reducción de hasta el 89 % en la profundidad del canal, lo que también se traduce en menores cargas de viento cuando el viento incide de frente. Sin embargo, el estudio indica que los perfiles 1 y 2 presentan mayores cargas de viento en la parte trasera en comparación con el diseño parabólico tradicional, por lo que se recomienda evaluar la inclusión de protectores traseros en futuras investigaciones.

Saieed et al. [4] mencionan que la mejora en el calor transferido de los calentadores solares mediante la integración de nanofluidos y materiales cambiantes de fase (PCM). Se diseñó un sistema innovador que incorpora un medio de almacenamiento basado en PCM en el colector de tubo al vacío con forma U, utilizando nanopartículas de Al_2O_3 para mejorar su rendimiento térmico. A través de simulaciones matemáticas, se evaluaron los procesos de fusión y solidificación del PCM en intervalos de 3600 s durante el día y la noche. Los resultados mostraron una mejora notable en la eficiencia al añadir nanopartículas, especialmente en la concentración óptima de 0.5 % en peso, lo cual aceleró la transferencia de calor en las mañanas y optimizó el proceso de descarga térmica en la ausencia de luz solar. Con lo que se demostró el potencial de los PCM mejorados con nanomateriales para optimizar la eficiencia de los sistemas de calentamiento, minimizando así la dependencia de unidades auxiliares de refuerzo.

Abdul-Ghafoor et al. [5] propusieron un modelo numérico para analizar la eficiencia térmica en sistemas de tubos de vacío con tuberías coaxiales, optimizando su diseño mediante la colocación de reflectores laterales ajustables para incrementar la absorción de radiación solar. El modelo evaluó el efecto de ángulos de espejos, de 30 a 90 ° y anchos de las paredes reflectantes de 250 a 500 mm en la temperatura de los tubos. Los resultados indicaron que un ángulo de 30 ° y un ancho de 500 mm maximizan la eficiencia térmica, alcanzando un 86 % al mediodía. Por lo que, se destaca el impacto de estos ajustes en la distribución de la radiación reflejada, proponiendo el diseño estructural óptimo para mejorar la absorción.

Wang et al. [6] evaluaron diferentes colectores solares de aire con tubos al vacío, un tubo convencional y otro tubo transparente, ambos basados en arreglos de microtubos de calor planos. La metodología consistió en diseñar ambos colectores con distintas ubicaciones de recubrimiento de absorción: en la pared interna del tubo de vacío para el convencional y en la

sección de evaporación para el tubo transparente. Los resultados mostraron que, aunque el tubo transparente alcanzó una mayor eficiencia térmica igual a 85 % respecto al 77.6 % del tubo convencional, este último generó más energía útil, un valor de 641 W y el transparente 497 W. Además, la inversión inicial fue menor en el tubo convencional con USD 0.15 por W frente a USD 0.21 W para el tubo transparente. En términos de capacidad de calefacción y costo-beneficio, el tubo convencional es una opción más favorable para aplicaciones como calefacción y secado de cultivos en campo, convirtiéndose en una referencia útil para el diseño de colectores de tubos al vacío.

Aytac et al. [7] examinaron la mejora del rendimiento en colectores de agua con tubo al vacío y tubos de calor, utilizando un nanofluido de cuarzo/agua como fluido de trabajo. La investigación incluyó simulaciones numéricas y experimentos para analizar el comportamiento del flujo y los procesos de evaporación-condensación en los tubos. Las simulaciones mostraron cómo el calor se transfiere en el tubo, permitiendo mejorar la eficiencia del sistema. Los resultados evidenciaron que el rendimiento con agua deionizada varió entre 29.63 y 75.92 % según el flujo, mientras que al usar nanofluido de cuarzo/agua la eficiencia se incrementó a rangos de 43.87 a 85.64 % en las mismas condiciones. Esto representó un aumento de la eficiencia exergética en un rango de 34.23 a 99.97 %. Por lo que se afirma que los nanofluidos de cuarzo/agua pueden extender su aplicación en tecnologías sostenibles para la calefacción y desalación de agua.

1.2 Energía solar

El sol es la fuente de radiación, y esta se utiliza para generar calor o electricidad. Es una energía limpia con un impacto ambiental mínimo comparado con las fuentes de energía fósil. Es aprovechado en dos maneras, generando electricidad mediante células fotovoltaicas [8] y mediante el calentamiento de diferentes fluidos, mejor conocida como energía térmica. Esta última justifica la conversión de la radiación solar en calor y se aprovecha para generar agua caliente para el consumo doméstico [9]. La figura 1 representa la instalación de un campo de captadores en una vivienda



Figura 1. Energía solar térmica

Esta energía se transfiere mediante ondas electromagnéticas las cuales van a velocidad de la luz. La luz en un vacío viaja aproximadamente 3×10^8 m/s, lo que significa que la luz del sol tarda alrededor de 8 min en arribar a la Tierra [11]. El calor transferido mediante radiación electromagnética puede ocurrir en espacio vacío, lo que permite que la energía se propague sin necesidad de un medio material. Cualquier temperatura que supere el cero absoluto de -273.15 °C emite energía radiante hacia su entorno. El tipo de radiación electromagnética se considera la longitud de onda, variando ampliamente a lo largo del espectro electromagnético, con ondas largas de radio hasta rayos gama muy cortos. Esta energía es generada por la radiación solar proveniente del sol, y se considera que la radiación que existe en la tierra es de 1.5×10^{18} k·Wh. Por lo tanto, se puede afirmar que se dispone de energía con un enorme potencial y, además, se trata de energía renovable [12]. La figura 2 muestra estos espectros de radiación emitidos por el sol.

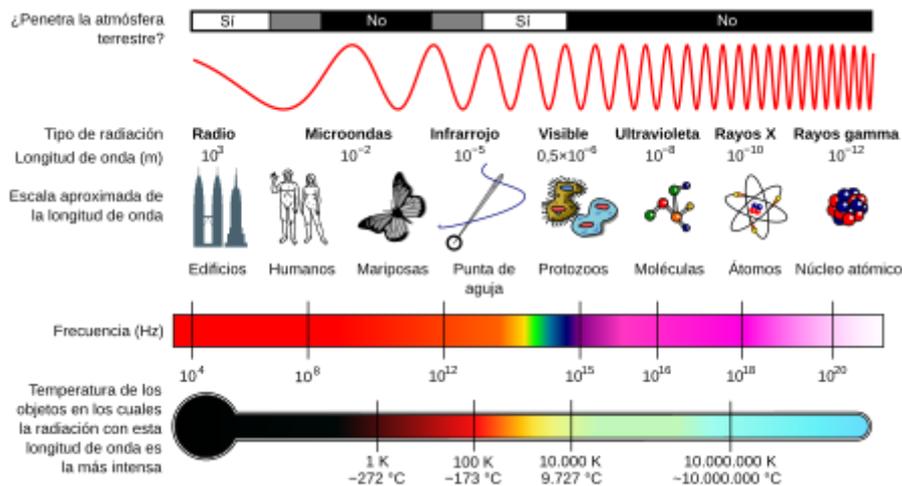


Figura 2. Espectros de radiación solar

1.3 Aplicaciones relacionadas a energía proveniente del sol

La aplicación térmica puede cubrir el 12 % de las necesidades energéticas globales previstas para 2050. Incluso las previsiones más moderadas sobre el futuro crecimiento del mercado indican que la capacidad de las diferentes formas de energía solar podría alcanzar los 25 GW para 2020 y 850 GW para 2050, con un aumento de 60 GW por año. En los últimos años, la energía solar térmica ha avanzado de una tecnología emergente a una fuente confiable de producción de energía. Sin embargo, a finales de 2015, solo se habían instalado 5 GW de electricidad solar térmica en el mundo. Los proyectos en curso estiman añadir un incremento superior al 82 % anual, principalmente en Sudáfrica, India y Medio Oriente [14].

La energía solar térmica produce calor mediante el uso de diferentes técnicas, siendo una alternativa ampliamente utilizada los espejos, que reúnen rayos solares a temperaturas entre 300 y 1000 °C. Actualmente, las plantas de energía solar térmica tienen una capacidad que varía entre unos pocos MW y 400 MW, aunque esta capacidad puede aumentar aún más y sigue siendo un tema de desarrollo tecnológico [15]. Esta energía se puede integrar en sistemas de almacenamiento térmico o en regímenes híbridos, ofreciendo una capacidad confiable y energía redistribuible bajo demanda.

Además, la energía solar térmica contribuye significativamente a reducir emisiones globales de CO₂, y su capacidad para redistribuir energía permitiría una reducción adicional de las

emisiones al hacer posible el uso confiable y asequible de energías renovables intermitentes. Con aproximadamente el 5 % de la inversión mundial en infraestructuras energéticas, la energía solar térmica tiene un lugar destacado en la Nueva Economía Verde [16].

1.4 Sistemas de calentamiento de agua

El sistema para calentar agua utilizando energía procedente del sol captura la radiación solar para calentar este fluido, y se clasifica en tres tipos según la temperatura a la que entregan calor. Los colectores de temperatura baja se utilizan para calentar agua en sistemas domésticos simples. Los colectores de temperatura intermedia, que cuenta con cobertura de vidrio y aislados, son más eficientes para aplicaciones como la calefacción de agua en piscinas [17]. Los colectores de alta temperatura, como los tubos evacuados y los colectores concentradores, se utilizan en industrias que requieren calor a temperaturas altas, e incluso para generar electricidad.

En EEUU, el calentamiento de agua es responsable de una parte significativa del consumo energético de los edificios. Sin embargo, solo alrededor del 1 % de esta energía se obtiene a través de fuentes solares. A pesar de este porcentaje relativamente bajo, el calentamiento de agua con esta alternativa ha crecido el 3 % en edificios ya equipados con sistemas solares. Esto sugiere que la energía solar podría cubrir los requerimientos energéticos de los edificios en el futuro [18]. La figura 3 representa las fuentes energéticas que se utilizan para calentar agua.

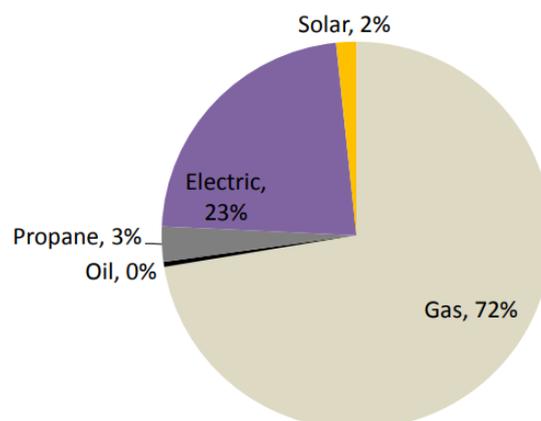


Figura 3. Fuentes energéticas utilizadas en el calentamiento de agua

Los sistemas solares de calentamiento de agua reducen el consumo energético convencional, lo

que genera una capacidad para cubrir hasta un tercio de la carga energética de cada edificio. Con el crecimiento e implementación de estas tecnologías, la energía solar está influyendo significativamente en la constante disminución de la irradiación de gases de efecto invernadero (GEI) y transformando al sistema energético sustentable y menos dependiente de fuentes fósiles.

1.4.1 Sistema pasivo, termosifón, directo

El sistema pasivo termosifón directo utiliza la convección natural para calentar el agua, donde el agua calentada asciende desde el colector hasta el depósito de almacenamiento debido a la diferencia de temperatura y densidad. Este sistema no requiere bombas ni componentes eléctricos, lo que lo hace económico y sencillo de mantener. Sus ventajas incluyen bajo mantenimiento provocado por la cantidad reducida de partes móviles y bajo costo por no necesitar bombas ni equipos auxiliares [19].

1.4.2 Sistema activo, circuito abierto, bombeado directo

En el sistema activo de circuito abierto bombeado directo, el agua es bombeada mediante un colector solar y luego al tanque. A diferencia del sistema pasivo, este utiliza electricidad en el control del caudal de agua, lo que proporciona mayor control y eficiencia. Aunque es eficiente en el calentamiento del agua, presenta alta necesidad de mantenimiento debido a las bombas y a la circulación constante de agua. Además, el sistema no está diseñado para protegerse contra las heladas, tampoco es adecuado para zonas frías y tiene tolerancia mínima a aguas duras, lo que puede generar acumulación de minerales [20].

1.4.3 Sistema activo, circuito cerrado (anticongelante), indirecto

El sistema activo de circuito cerrado con anticongelante circula un fluido térmico (usualmente anticongelante) a través del colector solar y la conmutación de calor para incrementar la temperatura del agua potable que se encuentra almacenada. Este sistema es más complejo y ofrece excelente protección contra las heladas, lo que lo hace adecuado para climas fríos. Además, tiene buena tolerancia a aguas duras, ya que el agua potable no está en contacto directo con el colector [21]. Pero su diseño implica altos requisitos de mantenimiento debido a los componentes adicionales, como las bombas y el fluido anticongelante.

1.4.4 Bomba de calor

Estos sistemas utilizan electricidad para transferir calor desde el aire o el suelo hacia el agua, ofreciendo una alternativa eficiente energéticamente. Aunque tiene un alto costo inicial, especialmente en sistemas geotérmicos, su alta eficiencia compensa este gasto, ya que produce más energía de la necesaria en su consumo [22] .

1.4.5 Colector solar de placa plana

Fue diseñado para absorber la radiación a través de una superficie plana. El balance térmico implica la absorción de radiación solar, las pérdidas térmicas debidas al diferencial de temperatura con el entorno, y la generación de calor útil que es transmitido al agua que fluye por el colector. Son eficientes en áreas con buena radiación solar y temperaturas moderadas [23].

1.4.6 Tubo de calor

El sistema de tubo calorífico se caracteriza por un tubo sellado que contiene un fluido que cambia de fase para transferir el calor desde el colector hacia el tanque. Estos sistemas son altamente eficientes porque pueden transferir calor con muy poca diferencia en la temperatura del colector y el tanque. Además, no tienen partes móviles, lo que los hace confiables y de bajo mantenimiento. Son ideales para regiones frías, ya que funcionan bien incluso a temperaturas más bajas debido a su diseño especializado [23].

1.5 Colectores de tubos de vacío

Funcionan según un sistema de tubo de calor que se basa en principios termodinámicos, donde el absorbedor dentro del tubo absorbe la radiación y calienta un pequeño volumen de fluido, se vaporiza debido al calor absorbido y asciende hasta arriba del tubo, lugar donde se condensa y libera el calor al fluido de calor transferido del circuito primario para que el fluido luego regrese a su estado líquido. El vacío de tubos concéntricos de vidrio reduce significativamente las pérdidas de calor debido a las propiedades aislantes del vacío, mejorando la capacidad del colector para capturar y retener energía solar [24]. Este diseño minimiza la pérdida térmica y asegura que más energía esté disponible para su uso.

Su eficiencia se determina por la relación entre el diferencial de temperatura (ΔT) entre el agua

y su alrededor, y la radiación que el colector absorbe. La eficiencia se describe como una relación entre la potencia térmica impregnada por el fluido de transferencia de calor y radiación cuando esta incide sobre la superficie del colector. Esta eficiencia está en función del diferencial de temperatura, ya que cuando se incrementa este diferencial entre las temperaturas tanto interna del colector y la estándar, también lo hace la eficiencia, hasta cierto punto. La eficiencia de este sistema puede variar según la intensidad de radiación y el colector, lo que lo hace adaptable a diversas condiciones climáticas. El uso de un concentrador parabólico cilíndrico detrás de los tubos ayuda a concentrar la luz solar desde varios ángulos hacia el absorbedor, asegurando la máxima absorción incluso durante posiciones no ideales del sol [25].

1.6 Criterios de diseño

Este tipo de sistemas requiere un proceso fundamental que garantice la eficiencia, la longevidad y la adecuación del sistema para su aplicación específica. Un parámetro a considerar en el diseño es la ubicación geográfica del sistema. La radiación en una región específica varía considerablemente según la latitud, el clima y las variaciones estacionales. En las regiones cercanas al ecuador, se recibe más luz solar directa durante todo el año, mientras que las zonas más alejadas experimentan inviernos más largos y menos luz solar directa, lo que afecta la eficiencia del colector [26]. Por lo tanto, el diseño de un calentador debe adaptarse a las condiciones locales para asegurar que el sistema funcione eficientemente a pesar de las variaciones en la disponibilidad de luz solar.

El volumen de almacenamiento es una consideración de diseño que impacta directamente en el rendimiento del sistema. Un tanque de almacenamiento más grande permite almacenar más agua caliente, proporcionando suficiente agua incluso en días nublados o durante períodos con menor radiación solar. El sistema debe estar diseñado para equilibrar la recepción energética y la capacidad de almacenamiento con el volumen de agua caliente, garantizando que la energía producida sea suficiente para las necesidades diarias del hogar o pequeña industria. El clima local también influye en esta decisión, ya que en zonas más frías puede ser necesario un tanque más grande o una mejor aislación para prevenir la disipación térmica y conservar la temperatura alta del agua [27].

1.7 Materiales

Los materiales deben ser seleccionados por su durabilidad, resistencia a la corrosión y capacidad para soportar altas temperaturas. Comúnmente se utilizan tubos de vidrio borosilicato para los tubos de vacío y acero inoxidable o cobre para las tuberías. El proceso de construcción incluye la fabricación de los tubos de vacío, el ensamblaje del absorbedor, la instalación del tanque y la configuración del sistema hidráulico.

1.8 Comparación con otros sistemas

El sistema se basa en un colector solar, existen diferentes tipos, planos, tubos de vacío y concentración. El colector de placa plana (CPP) es el más utilizado, siempre y cuando la temperatura a la que se requiere que llegue el fluido no sea superior a 100 °C [28]. El absorbedor se encarga de capturar la radiación y, al calentarse, transmite energía térmica al fluido que fluye a través de su interior. La caja o carcasa que lo alberga cuenta con una apertura superficial, mientras que, la parte baja está equipada con un material aislante.

Cuando la carcasa incluye una cubierta, esta suele estar conformada por láminas transparentes, como vidrio o diferentes materiales que permiten el acceso de la radiación solar de onda corta, pero que bloquean la radiación de baja temperatura emitida por el absorbedor. Esto genera un efecto invernadero que retiene la radiación en el colector. Para aminorar la pérdida de calor por conducción, se utilizan materiales aislantes en las paredes y el fondo de la carcasa. Sin embargo, permitir que la radiación solar alcance el absorbedor hace imposible eliminar por completo las pérdidas de calor por la parte superior. Una solución común es emplear múltiples láminas en la cubierta, ya que la cámara de aire entre ellas reduce la transferencia de calor por convección. No obstante, esta estrategia incrementa la proporción de radiación reflejada, disminuyendo así la eficiencia del sistema. La figura 4 permite observar las partes del colector plano [23].

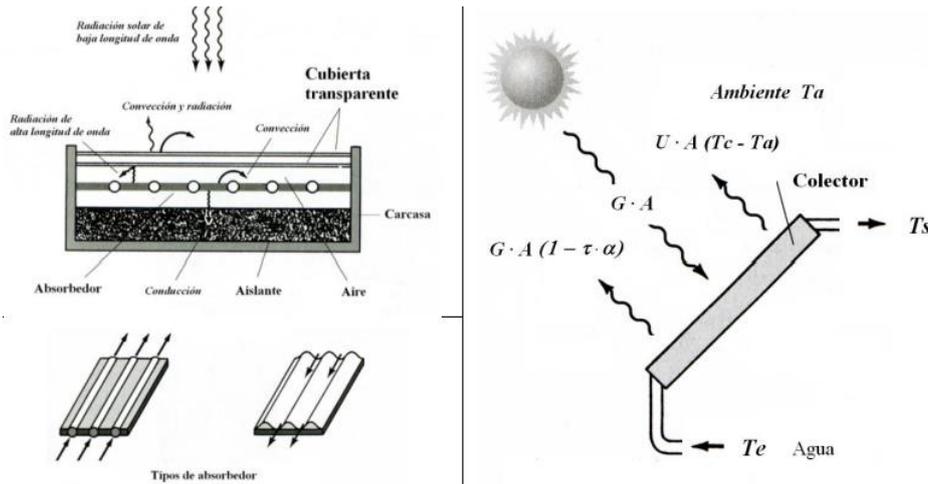


Figura 4. Partes del colector solar plano.

En los CSTV, se busca minimizar las pérdidas térmicas por diferentes mecanismos de transferencia de calor por medio del absorbedor y la cubierta eliminando aire del interior de los tubos, similar al método empleado en las paredes de los termos. Dado que no es posible alcanzar un vacío absoluto, una alternativa efectiva es reemplazar el aire por un gas con menor conductividad térmica. La figura 5 muestra cómo, en los captadores de tubos de vacío tipo Schott, la reducción de la presión y el uso de gases nobles en lugar de aire pueden disminuir significativamente el coeficiente de pérdidas térmicas [29].

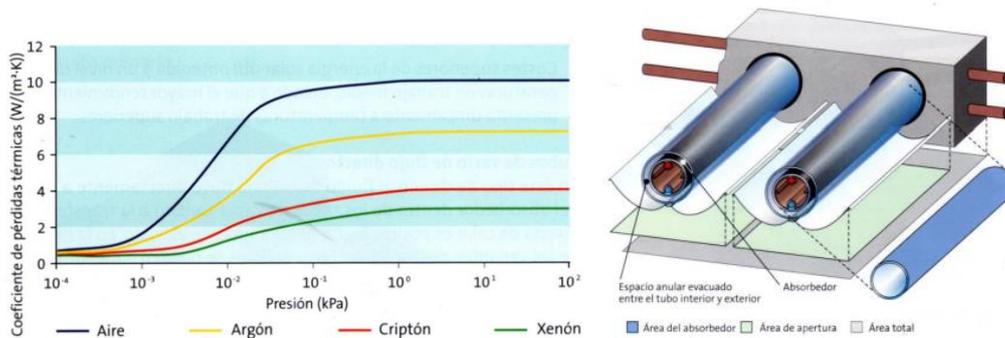


Figura 5. Colector de tubos de vacío.

Estos colectores de concentración, el seguimiento estático o fijo implica que la inclinación y orientación del colector permanecen invariables durante todo el año, lo que simplifica su instalación y mantenimiento. Esta configuración es común en CSPP y CSTV. Los sistemas con concentradores parabólicos compuestos (CPC) están formados por dos superficies reflectoras parabólicas, dispuestas de modo que el absorbedor se ubica en la línea que conecta los focos de ambas parábolas, mientras que el foco de cada parábola se encuentra en el extremo opuesto al

absorbedor [30]. Para maximizar su eficiencia, estos colectores pueden incorporar mecanismos que permitan ajusten su inclinación y optimizar la captación de radiación solar según las variaciones estacionales.

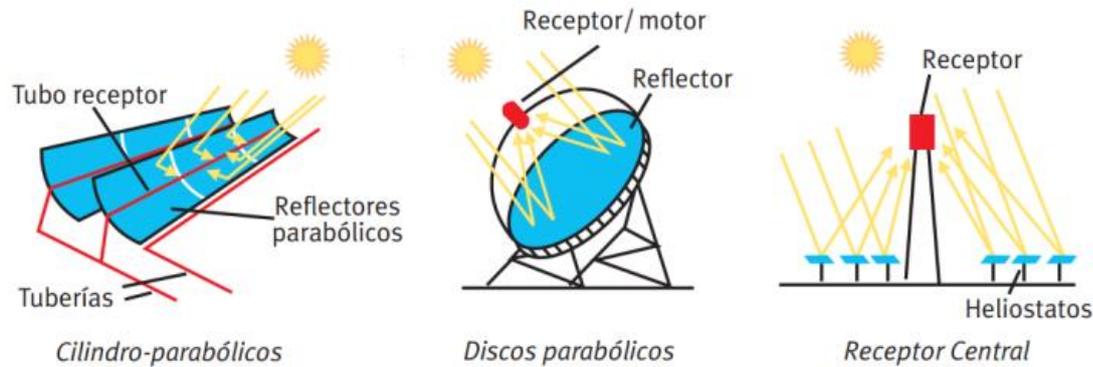


Figura 6. Colectores de concentración.

1.9 Eficiencia energética

Relaciona los beneficios obtenidos y energía utilizada para alcanzarlos. A diferencia de la efectividad, que evalúa el alcance de objetivos en una actividad, la eficiencia optimiza los recursos para maximizar el resultado [31]. En el contexto energético, este concepto se aplica a diferentes niveles y perspectivas, desde la economía macroeconómica, donde se evalúa la intensidad energética o la productividad energética (PIB por unidad de energía primaria), hasta la eficiencia de conversión energética en los procesos de suministro y la eficiencia en el uso final, lograda a través de cambios tecnológicos, organizacionales o conductuales.

Además, la eficiencia energética se aborda desde un enfoque más amplio, que incluye no solo los sectores productivos y de consumo, sino también las actividades no remuneradas, como las realizadas en los hogares, dentro de la llamada economía del cuidado. Aquí, la eficiencia energética abarca los esfuerzos energéticos asociados a la producción doméstica, como beneficios recreativos y de movilidad. Este enfoque reconoce la importancia de factores estructurales, climáticos y socioeconómicos en los indicadores utilizados para medir la eficiencia, como el consumo energético por metro cuadrado o por dispositivo [32].

Los colectores de tubos al vacío son efectivos en el calentamiento de agua, diseñada para utilizar de manera eficaz la energía solar. Debido a su estructura, estos sistemas pueden captar y retener el calor incluso en condiciones de radiación baja, minimizando pérdidas de energía debido a

factores como el viento o las bajas temperaturas. Sin embargo, su rendimiento puede variar según las condiciones climáticas locales. En climas moderados, como el de Polonia, estudios han demostrado que la eficiencia es más alta en meses soleados y puede disminuir con el aumento de la velocidad del viento o temperaturas más frías. Este comportamiento destaca la importancia de instalar estos equipos de manera estratégica y considerar soluciones como un mejor aislamiento o recubrimientos avanzados para optimizar su funcionamiento [33].

Además, la eficiencia de estos sistemas, si bien se mide en términos técnicos, también se mide en su impacto real en el ahorro de energía y en el uso sostenible de recursos. Es importante evaluar cuánto calor genera diariamente por metro cuadrado y analizar las posibles pérdidas durante su operación. Esto ayuda a mejorar su diseño y rendimiento, contribuyendo a que las personas y comunidades que los utilizan reduzcan costos y dependan menos de fuentes de energía convencionales [34].

1.10 Impacto ambiental

Los CSTV están diseñados para recibir eficientemente la radiación y calentar agua, estos sistemas minimizan significativamente el uso de combustibles fósiles. Al reemplazar métodos convencionales que incrementan la temperatura del agua, los tubos de vacío ayudan a reducir GEI y a conservar recursos no renovables. Sin embargo, su impacto ambiental va más allá de su operación, lo que requiere una evaluación integral de su ciclo de vida para garantizar una sostenibilidad real [35].

Uno de los beneficios ambientales más destacados de colectores de tubos al vacío enfatiza la capacidad de reducir las emisiones de carbono. Los sistemas tradicionales para calentar agua utilizan electricidad o gas natural y son importantes emisores de CO₂. En contraste, los tubos de vacío aprovechan directamente la energía solar y operan sin emitir contaminantes. Estudios sugieren que los hogares que adoptan sistemas solares para calentar agua pueden compensar varias toneladas de CO₂ al año, contribuyendo así a los objetivos climáticos globales y contribuyendo a la mejora del aire a nivel local [36].

Sin embargo, la huella ambiental de colectores solares a tubos de vacío también debe considerar los materiales y procesos involucrados en su fabricación. La producción de componentes como

vidrio, metal y recubrimientos selectivos requiere una cantidad significativa de energía, lo que a menudo genera emisiones y desechos. Además, la eliminación de colectores obsoletos o dañados presenta desafíos, ya que algunos materiales son difíciles de reciclar o pueden contribuir a la acumulación de residuos en los vertederos [37]. Abordar estos problemas requiere implementar métodos de producción sostenibles, incorporar materiales reciclados y diseñar productos que faciliten su desmontaje y reutilización.

A pesar de estos desafíos, los colectores de tubos al vacío se alinean bien con principios de la economía circular. Los avances en la eficiencia de materiales, como recubrimientos más delgados pero duraderos, han reducido el consumo de recursos mientras se mejora el rendimiento. Además, las políticas de responsabilidad extendida del productor pueden garantizar que los fabricantes se responsabilicen por el reciclaje y la eliminación segura. Estas medidas ayudan a minimizar los desechos y promueven un ciclo de vida más sostenible para la tecnología solar [38]. Más allá de sus beneficios operativos y de ciclo de vida, estos colectores fomentan un cambio en los hábitos de consumo energético. Al adoptar tecnologías solares descentralizadas, los hogares y las empresas reducen su dependencia de los sistemas de energía centralizados, aumentan la resiliencia y promueve redes energéticas más limpias [39]. Además, la integración de CSTV en estrategias energéticas renovables más amplias fortalece la transición hacia infraestructuras energéticas sostenibles.

En conclusión, estos colectores ofrecen beneficios ambientales sustanciales al brindar solución limpia y renovable para calentar agua. Si bien su operación no genera emisiones, es esencial abordar los impactos relacionados con la fabricación y la eliminación para maximizar su sostenibilidad. Con avances tecnológicos y políticas de apoyo, estos colectores ayudan a la remisión del cambio climático y a la promoción de una transformación global hacia la energía renovable. Su adopción representa un paso fundamental hacia un futuro en el que las prácticas energéticas sostenibles sean parte integral de la vida cotidiana.

CAPÍTULO II

DESARROLLO METODOLÓGICO DE LA PROPUESTA

2.1 Enfoque metodológico

El enfoque metodológico de este proyecto es de tipo investigación aplicada. Se pretende diseñar y construir un dispositivo funcional basado en principios teóricos y técnicos preexistentes, adaptándolos a necesidades específicas. La investigación es experimental, ya que implica el proceso constructivo y prueba del calentador de agua solar para validar su diseño y funcionalidad.

2.2 Primera ley de la termodinámica

Explica el cambio de energía en el sistema, que es igual al calor adicionado en el sistema, sustrayendo la operación realizada. En los colectores solares, este principio rige las transformaciones de energía mientras la radiación calienta el agua. El calor absorbido aumenta la temperatura del fluido, permitiendo una transferencia de energía eficiente y alineada con el mandato de conservación de la ley, como es establece en la siguiente ecuación [40]:

$$E_{in} = E_{out} \quad (1)$$

2.3 Ecuación de conservación de la energía

Afirma que la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma. En los colectores solares, este principio se expresa como [41]:

$$Q_{solar} = Q_{agua} + Q_{pérdida} \quad (2)$$

Donde:

Q_{solar} : Energía solar térmica absorbida por el colector solar

Q_{agua} : Energía ganado por el agua

$Q_{pérdida}$: Pérdidas de calor en el colector solar

2.4 Radiación solar

La energía disponible que proporciona el sol puede estimarse al utilizar la siguiente ecuación

de cálculo de radiación incidente [42]:

$$G = G_0 \cdot \cos\theta \quad (3)$$

Donde:

G : Radiación promedio en la ubicación

G_0 : Radiación extraterrestre

θ : Ángulo de incidencia

2.5 Energía solar recibida

Es la radiación que incide sobre el área de un colector y depende de la ubicación, fecha, clima y orientación del colector. Maximizar la entrada solar es fundamental para aumentar el rendimiento energético del colector, influyendo directamente en su eficiencia y utilidad. Es calculada con la siguiente ecuación [43]:

$$Q_{solar} = A \cdot G \cdot \eta_{\text{óptica}} \quad (4)$$

Donde:

A : Área del colector

$\eta_{\text{óptica}}$: Eficiencia óptica del colector

La eficiencia óptica cuantifica la capacidad del colector en la generación de energía térmica útil que parte de la radiación incidente. Los factores que influyen en esta métrica consideran el diseño del colector, materiales y propiedades ópticas, como la absorbancia, la reflectividad y la transmitancia.

La transferencia de calor por radiación es calculada con la Ley de Stefan-Boltzmann, cuya constante es $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ y se expresa con la siguiente ecuación [44]:

$$Q_{rad} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_s^4 - T_{\infty}^4) \quad (5)$$

Donde:

σ : Constante de Stefan-Boltzmann

ε : Emisividad

$^{\circ}T_s$: Temperatura superficial del tubo

$^{\circ}T_{\infty}$: Temperatura ambiente

2.6 Energía térmica transferida al agua

Se refiere al calor que un sistema transmite al agua o fluido térmico en un proceso de calentamiento. En sistemas solares térmicos, como los colectores solares, capturan la radiación y generan energía térmica, para ser transferida al agua que circula a través de ellos. Se calcula como la diferencia de temperatura del agua antes y después de pasar por el sistema solar, multiplicada por el caudal de agua y la capacidad calorífica del agua, mediante la siguiente ecuación [45]:

$$Q_{agua} = m \cdot c_p \cdot \Delta T_{agua} \quad (6)$$

Donde:

m : Masa del agua circulante en el colector

c_p : Calor específico del agua

$\Delta^\circ T_{agua}$: Diferencial de temperatura

2.7 Pérdidas térmicas de energía

Las pérdidas térmicas ocurren cuando el calor escapa del sistema colector debido a la conducción, la convección o la radiación. Estas pérdidas están afectadas por la calidad del aislamiento, la temperatura ambiente y las condiciones del viento. Minimizar las pérdidas térmicas es una prioridad en el diseño de colectores para garantizar la retención de energía y el rendimiento. Estas pérdidas de calor pueden expresarse con la siguiente ecuación [46]:

$$Q_{pérdida} = U \cdot A_p \cdot \Delta T_{sistema} \quad (7)$$

Donde:

U : Coeficiente global de TC

A_p : Área

$\Delta^\circ T_{sistema}$: Diferencial de temperatura del sistema

2.8 Coeficiente global de transferencia de calor

Es un parámetro con el que se mide la capacidad de un sistema para perder calor en el entorno por mecanismos como la conducción, convección y radiación. Este coeficiente se utiliza para evaluar las pérdidas térmicas en sistemas de calor transferido, como colectores térmicos o

intercambiadores de calor. En los colectores solares, este coeficiente se usa para cuantificar las pérdidas térmicas hacia el ambiente debido a pérdidas por convección por la corriente de aire sobre el colector. Además, por pérdidas por radiación, de la emisión de energía infrarroja al ambiente desde las superficies calientes. La energía perdida por estas vías se calcula con la ecuación [47]:

$$U = \frac{1}{R_{total}} \quad (8)$$

Donde:

R_{total} : Resistencia térmica total del sistema, que incluye la contribución de diferentes capas o mecanismos.

2.9 Eficiencia del colector solar

Este índice evalúa la efectividad del sistema generar calor a partir de energía solar, donde un alto rendimiento indica un sistema optimizado con pérdidas de energía mínimas. El rendimiento del colector relaciona la energía térmica útil y la energía solar que se ha absorbido, calculado mediante la siguiente ecuación [48]:

$$\eta = \frac{Q_{agua}}{Q_{solar} + Q_{pérdida}} \quad (9)$$

2.10 Tiempo de calentamiento

Se refiere al tiempo necesario para que el colector eleve la temperatura del fluido de trabajo al nivel deseado. Depende de factores como la intensidad solar, la capacidad del colector y el diseño del sistema. Los tiempos de calentamiento más cortos reflejan una absorción y transferencia de energía eficientes, calculando este valor mediante la ecuación:

$$t = \frac{Q_{agua}}{P_{solar}} \quad (10)$$

Donde:

t : Tiempo de calentamiento

P_{solar} : Potencia solar disponible

2.11 Transferencia de calor en los tubos de vacío

La conducción permite que el calor se transfiera por medio de un material sólido debido a una disimilitud de temperatura. En los tubos al vacío, este fenómeno tiene lugar en las paredes del tubo, desplazándose el calor desde la superficie con una temperatura elevada hacia una menor, lo cual se describe mediante la siguiente ecuación [49]:

$$Q_{cond} = \frac{\Delta T}{R_{cond}} \quad (11)$$

Donde:

Q_{cond} : Calor transferido por conducción

ΔT : Diferencia de temperatura por el material

Una resistencia térmica de conducción (R_{cond}) es calculada como:

$$R_{cond} = \frac{L}{k \cdot A} \quad (12)$$

Donde:

L : Longitud del material

k : Conductividad térmica

La convección térmica es el mecanismo por el cual el calor se transfiere a través de la superficie del tubo y el aire que lo rodea. Este fenómeno puede ocurrir de forma natural, como resultado de disimilitudes de densidad provocadas debido a alteraciones sobre la temperatura, o impuesto mediante el uso de ventiladores u otros dispositivos. En el caso específico del tubo, la convección natural en su superficie se describe mediante el siguiente modelo [50]:

$$Q_{conv} = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (13)$$

Donde:

h : Coeficiente convectivo de calor transferido

Las resistencias térmicas representan las barreras para la circulación de calor en el sistema. En relación con el tubo de vacío, las resistencias térmicas combinan los efectos de la conducción a través del material del tubo y la convección hacia el ambiente, afectando el flujo de calor total,

mediante la siguiente ecuación:

$$R_{total} = R_{cond} + R_{conv} \quad (14)$$

2.12 Número de tubos de vacío

El número de tubos para el colector determina su capacidad de absorción de energía. Cada tubo actúa como un absorbente independiente, y aumentar el número de tubos mejora la capacidad del sistema para manejar mayores demandas energéticas. Una configuración y distribución adecuadas de los tubos son esenciales para que el calor transferido se distribuya de manera uniforme y eficiente. Es calculado considerando la energía requerida y la eficiencia de cada tubo, mediante la siguiente ecuación [51]:

$$N = \frac{Q_{agua}}{Q_{solar,tubo}} \quad (15)$$

Donde:

N : Número de tubos

$Q_{solar,tubo}$: Energía solar captada por cada tubo

2.13 Análisis numérico del sistema

Engineering Equation Solver (EES) se utiliza en la resolución de las diferentes ecuaciones algebraicas y diferenciales relacionadas con los procesos de calor transferido, termodinámica y mecánica de fluidos. EES incluye bases de datos con propiedades termofísicas detalladas para sólidos, líquidos y gases, como conductividad térmica, viscosidad, capacidad calorífica y densidad. La tabla 1 presenta el listado de materiales con la respectiva conductividad térmica para las tuberías comerciales utilizadas para la conducción de agua.

Tabla 1. Materiales de tuberías comerciales

Material	Conductividad Térmica (k) [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Clasificación
Cobre	385	Muy alta transferencia
Aluminio	205	Alta transferencia
Acero inoxidable	15 – 25	Moderada transferencia
Hierro galvanizado	45 – 80	Moderada transferencia
PVC (Plástico)	0.16 – 0.25	Baja transferencia

El análisis del material a seleccionar debe considerar el máximo calor transferido del exterior hacia dentro de la tubería, por lo que la conductividad debe ser máxima. La figura 7 presenta el análisis en EES, considerando temperaturas estimadas de 20 °C al ambiente y el requerimiento de 40 °C para el agua caliente. Se definió los valores de conductividad para los diferentes materiales y se evidencia que el cobre genera el máximo calor transferido por conducción.

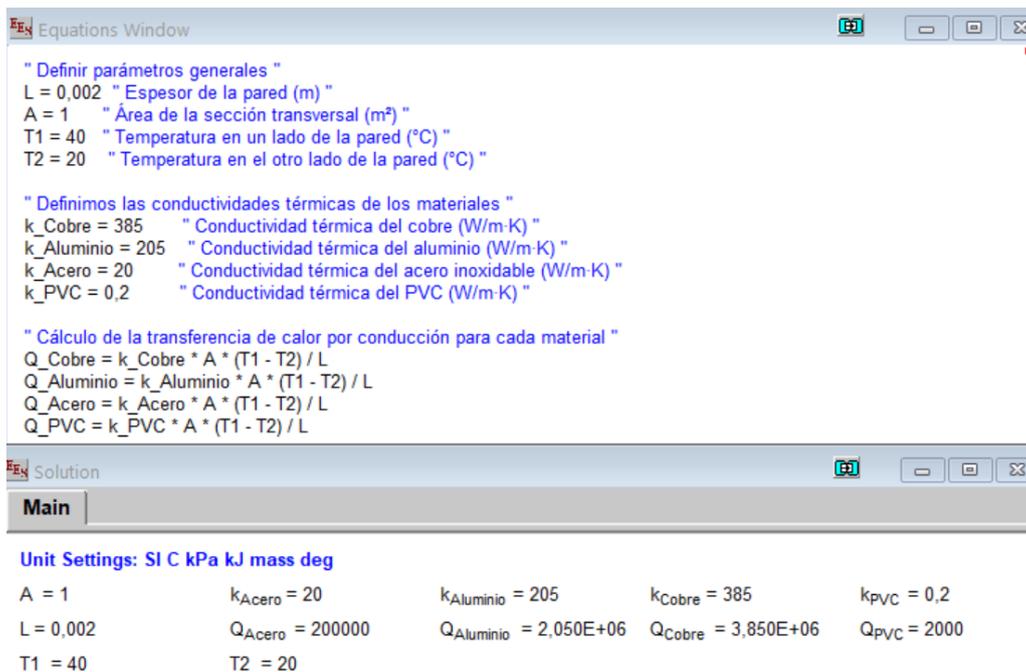


Figura 7. Estimación del calor transferido por conducción en la tubería.

Para alta transferencia de calor donde se busca la máxima eficiencia, como en sistemas termosolares, el cobre resulta la mejor alternativa; sin embargo, también es la alternativa de mayor costo. Cada metro de tubería de cobre de 12.7 mm se vende por USD 8.50, por lo que es necesario considerar alternativas que encajen con el presupuesto estimado. Por el bajo costo y resistencia química, las tuberías de PVC son ampliamente utilizadas, aunque menos eficientes

térmicamente, considerando que la temperatura debe llegar a 40 °C. En el mercado local, las tuberías de PVC se venden por unidades de 6 m de longitud a un costo de USD 9.20, por lo que se considera una excelente alternativa en durabilidad, economía y que aún permite la transferencia de calor.

Un análisis similar se siguió para definir si la implementación de aislantes es necesaria o no, por lo tanto, la tabla 2 presenta los materiales más comunes utilizados para disminuir las pérdidas de calor.

Tabla 2. Materiales aislantes

Material	Conductividad Térmica (k) [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	Clasificación
Aerogel	0.013 – 0.02	Extremadamente eficiente
Espuma de poliuretano	0.02 – 0.03	Muy eficiente
Lana mineral	0.035 – 0.045	Alta eficiencia
Fibra de vidrio	0.035 – 0.04	Alta eficiencia
Poliestireno expandido (EPS)	0.03 – 0.04	Alta eficiencia
Espuma Elastomérica	0.033 – 0.037	Moderada eficiencia

La figura 8 presenta la programación en EES para la validación de las máximas y mínimas pérdidas de calor utilizando materiales aislantes.

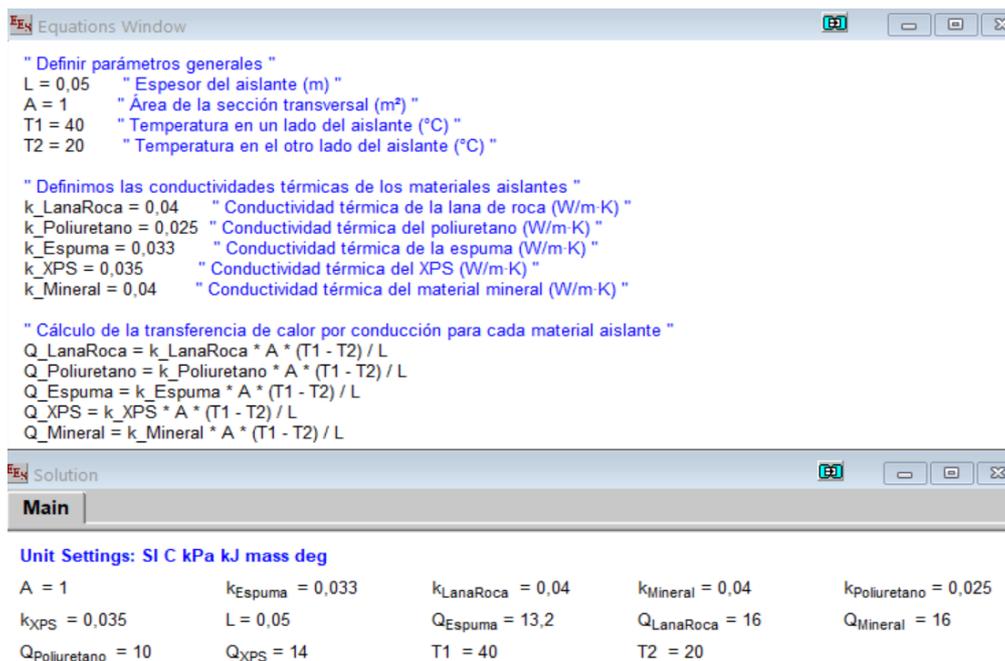


Figura 8. Estimación de pérdidas de calor utilizando aislantes.

De igual manera, para la selección de alguna alternativa, si se considera las pérdidas mínimas de calor, la espuma de poliuretano resulta la mejor, pero en el mercado local tiene un costo de USD 7.30 cada envase de 900 g. Por otra parte, una alternativa que se utiliza con frecuencia es la lana de vidrio, que tiene un costo de USD 10 por cada m^2 . Se estima un área de 2 m^2 para el colector solar, por lo que se necesitarían 4 envases de espuma de poliuretano, mientras que, se necesitaría 2 m^2 de fibra de vidrio, convirtiendo a esta última en la alternativa más viable, cabe mencionar que en el tanque de almacenamiento se consideró un espesor de 10 mm de aislante para evitar las pérdidas de calor.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Estimación del requerimiento de agua caliente

Un hogar ecuatoriano compuesto por tres miembros; madre, padre e hijo requiere diariamente de agua caliente, variando de acuerdo con hábitos de consumo y cantidad de actividades que requieran agua caliente. Por lo tanto, se asume que, cada miembro de la familia utiliza aproximadamente 50 L de agua caliente para ducharse. Por lo que se va a considerar un consumo total de 150 L al día.

3.2 Descripción del equipo

La tabla 3 describe las características del equipo en análisis, considerando las dimensiones, capacidades y materiales.

Tabla 3. Componentes del sistema

Elemento	Descripción
Tipo de sistema	Circuito cerrado
Tipo de intercambiador	Doble tanque envolvente
Capacidad total del agua [L]	150
Presión máxima circuito primario [bar]	2.5
Presión máxima circuito secundario[bar]	10
Recubrimiento exterior	Acero galvanizado
Revestimiento interior	Doble esmaltado
Tipo de aislamiento y espesor [mm]	Poliuretano – 50 mm
Protección catódica	Ánodo de magnesio
Área del colector [m ²]	2.09
Material de la caja	Aluminio
Aislamiento y espesor [mm]	Lana mineral – 55 mm
Peso [kg]	300
Alto [m]	1.7
Ancho [m]	1.15
Profundidad [m]	2.37

Para los 150 L se ha utilizado un colector solar de tubos al vacío para calentar el fluido y su funcionamiento consiste en absorción de radiación mediante los tubos de vacío. Los tubos están hechos de vidrio y funcionan bajo el principio de efecto de vacío, lo que les permite captar más calor y reducir las pérdidas térmicas. La radiación que refleja en los tubos se convierte en calor, calentando el fluido que circula dentro de ellos.

El flujo de agua en el sistema considera el principio de termosifón. El agua fría ingresa por la parte baja del colector y, al calentarse, asciende por los tubos debido a la disminución de su densidad. Este movimiento natural permite que el agua caliente se traslade hacia un tanque con capacidad de almacenamiento de 150 litros, el cual cuenta con aislamiento térmico de 10 mm, esto ayuda a disminuir las pérdidas de calor en el tanque de almacenaje. El agua caliente almacenada está disponible para uso doméstico, como duchas, lavamanos u otras aplicaciones.

El sistema está compuesto por tuberías de entrada y salida que conectan el colector con el tanque, facilitando el flujo continuo de agua caliente al tanque y el retorno del agua fría al colector. Los tubos de vacío, elementos principales del colector solar, absorben la radiación y transfieren el calor al agua que circula dentro de ellos. Además, incluye un tanque de almacenamiento térmicamente aislado que conserva el agua caliente hasta su uso. Un soporte estructural asegura y posiciona el CSTV, generalmente en el techo, para optimizar la captación solar. Finalmente, el sistema cuenta con válvulas y conexiones que regulan el flujo de agua entre el colector y el tanque, incluyendo dispositivos de seguridad como válvulas de sobrepresión para garantizar un funcionamiento seguro. La figura 9 muestra la implementación del sistema con sus componentes principales.

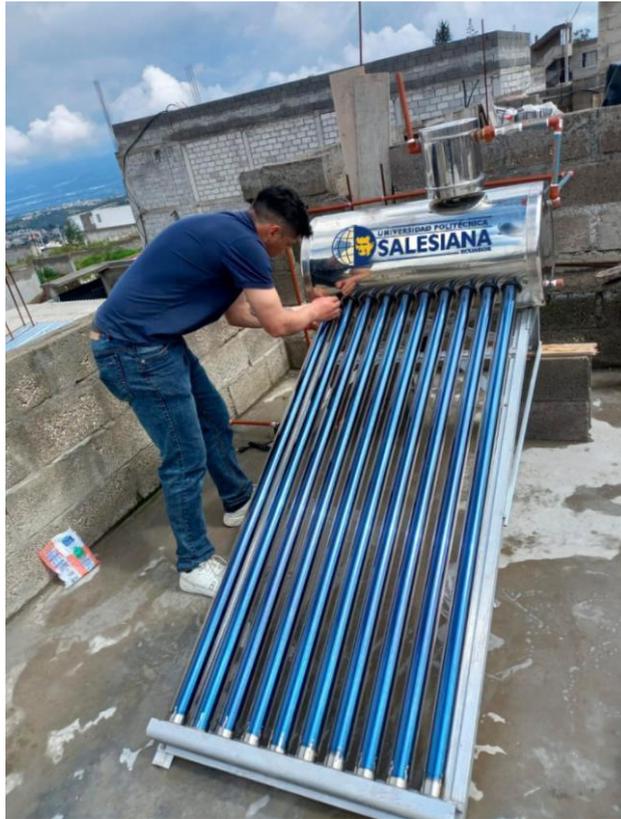


Figura 9. Sistema de tipo CSTV.

3.3 Medición de condiciones climáticas

El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) obtiene los valores de temperatura ambiente y velocidad del viento a través de varias estaciones meteorológicas que se distribuyen por el país. Estas estaciones recopilan datos de diversas variables atmosféricas, incluidas temperatura y velocidad del aire, utilizando equipos especializados y tecnologías metrológicas. La temperatura ambiente se mide utilizando termómetros digitales o termistores, que proporcionan lecturas precisas de temperatura del aire. La velocidad del mismo se mide con anemómetros, que son dispositivos con palas rotatorias que giran a medida que el viento pasa a través de ellas. La tabla 4 presenta valores de temperatura ambiente estándar y velocidad del viento en Quito de forma mensual.

Tabla 4. Condiciones ambientales en Quito 2023

Mes	Temperatura ambiente [°C]		Velocidad media del viento [$km \cdot h^{-1}$]
	Máxima	Mínima	
Enero	25.54	11.64	2.09
Febrero	22.77	11.53	2.20
Marzo	25.99	12.20	2.53
Abril	23.81	11.87	1.98
Mayo	25.42	12.09	2.86
Junio	26.34	12.09	3.41
Julio	27.14	12.88	4.40
Agosto	27.49	12.32	3.96
Septiembre	28.18	12.66	4.62
Octubre	26.34	11.30	2.42
Noviembre	26.34	11.87	2.09
Diciembre	25.42	11.30	2.31

La tabla 5 sintetiza la información de las medidas de temperatura alrededor del colector solar, que se obtuvieron a las mismas horas durante un mes.

Tabla 5. Temperatura superficial alrededor del colector solar [°C].

Lados	Superior	Inferior	Izquierdo	Derecho	Prom.
Sem. 1	35.28	47.63	39.98	48.22	42.78
Sem. 2	21.34	24.83	24.35	23.28	23.45
Sem. 3	23.27	27.62	42.17	27.42	30.12
Sem. 4	21.22	35.04	25.34	33.98	28.90

La tabla 6 presenta los valores de temperatura superficial del colector solar.

Tabla 6. Temperatura superficial del colector solar [°C].

Superficie	Superior	Media	Inferior	Prom.
Sem. 1	34.79	23.03	20.58	26.13
Sem. 2	44.23	41.03	37.24	40.84
Sem. 3	38.21	28.01	26.63	30.95
Sem. 4	39.84	36.192	29.76	35.26

Al considerar los datos de radiación solar registrados, junto con la temperatura ambiente y la

velocidad del viento suministrados por el INAMHI, se realizó una estimación de la temperatura máxima que alcanza el agua que está almacenada en el tanque. La tabla 7 muestra estos valores promedio obtenidos en los mismos horarios durante un período de un mes.

Tabla 7. Temperatura del agua caliente almacenada [°C].

	08:00	12:00	16:00	20:00	Prom.
Sem. 1	22.14	45.08	49.00	49.98	46.55
Sem. 2	36.56	51.41	58.20	57.23	53.35
Sem. 3	39.60	44.45	45.54	44.55	46.04
Sem. 4	35.52	46.08	51.84	48.00	45.36

3.4 Proceso de calentamiento

La figura 10 presenta valores de radiación solar promedio por cada semana, de acuerdo con los valores medidos. La salida del sol fue aproximadamente a las 6 am con valores alrededor de $20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ y a la puesta del sol, a las 6 pm, con valores promedios de $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. De manera general, se registró una radiación promedio de $426.89 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, mientras que el máximo valor de radiación se obtuvo durante la semana 4, alcanzando $851.03 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

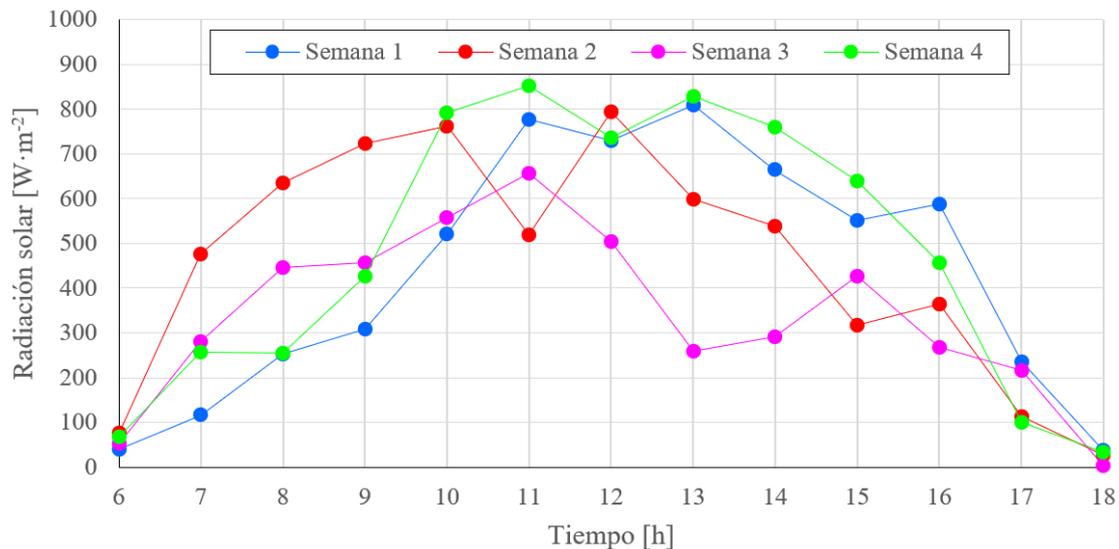


Figura 10. Radiación solar respecto al tiempo.

La figura 11 evidencia la variación de temperatura del agua en el tanque de almacenaje. Al considerar una temperatura de suministro de agua potable de 17 °C , durante la primera semana,

al iniciar las mediciones se registró una temperatura de 22.14 °C a las 8 am, hasta alcanzar 49.98 °C. El valor máximo de temperatura se generó en la segunda semana a las 4 pm, donde el agua estaba a 58.2 °C.

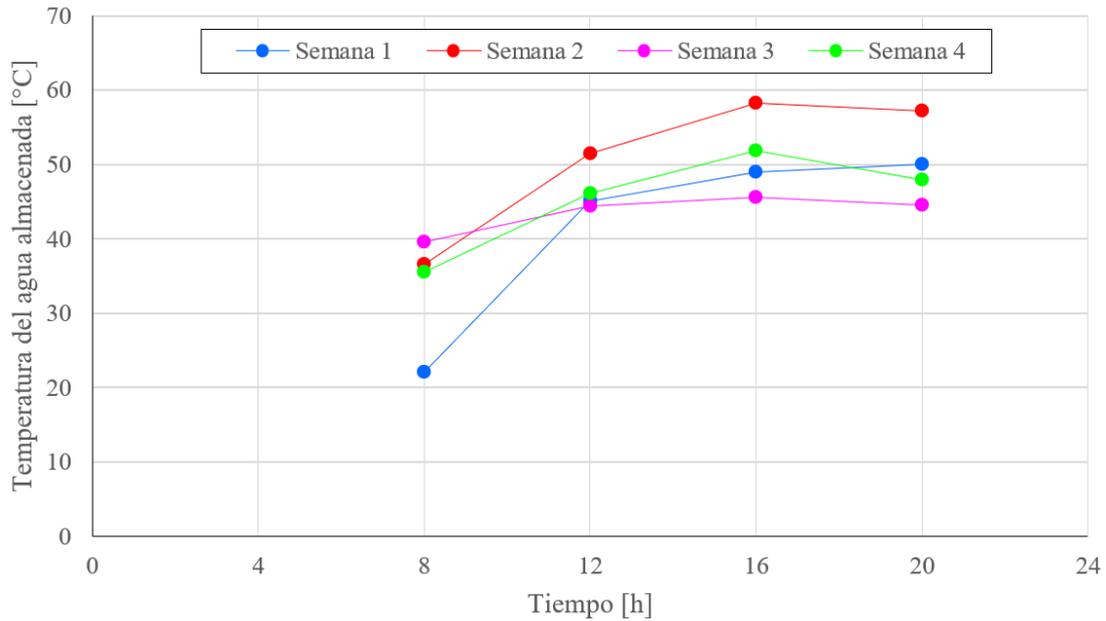


Figura 11. Temperatura del agua en el tanque respecto al tiempo.

La figura 12 relaciona el incremento de la temperatura del agua en el tanque de almacenaje y la respectiva radiación solar. Se visualiza que cuando la radiación solar aumenta, el agua absorbe más calor, lo que provoca un incremento en su temperatura. Tras el atardecer, cuando la radiación solar alcanza $0 \text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$, el agua intenta conservar su temperatura elevada gracias al diseño del sistema.

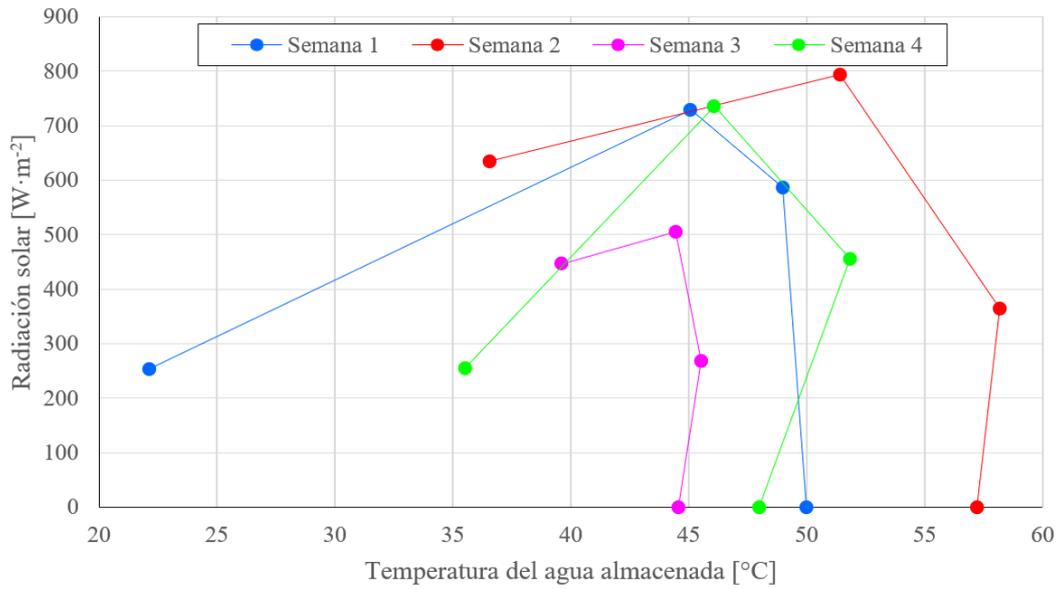


Figura 12. Temperatura del agua almacenada respecto a radiación.

La figura 13 explica el calor absorbido por el agua ante radiación incidente en el colector solar. En la semana 2 se obtuvo un valor máximo de radiación, de $793.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, y en promedio $467.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, donde se alcanzó el máximo valor de calor de 579.06 W . El calor absorbido promedio desde la semana 1 hasta la semana 4 fue de 375.63 , 467.31 , 323.28 y $355.11 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, respectivamente.

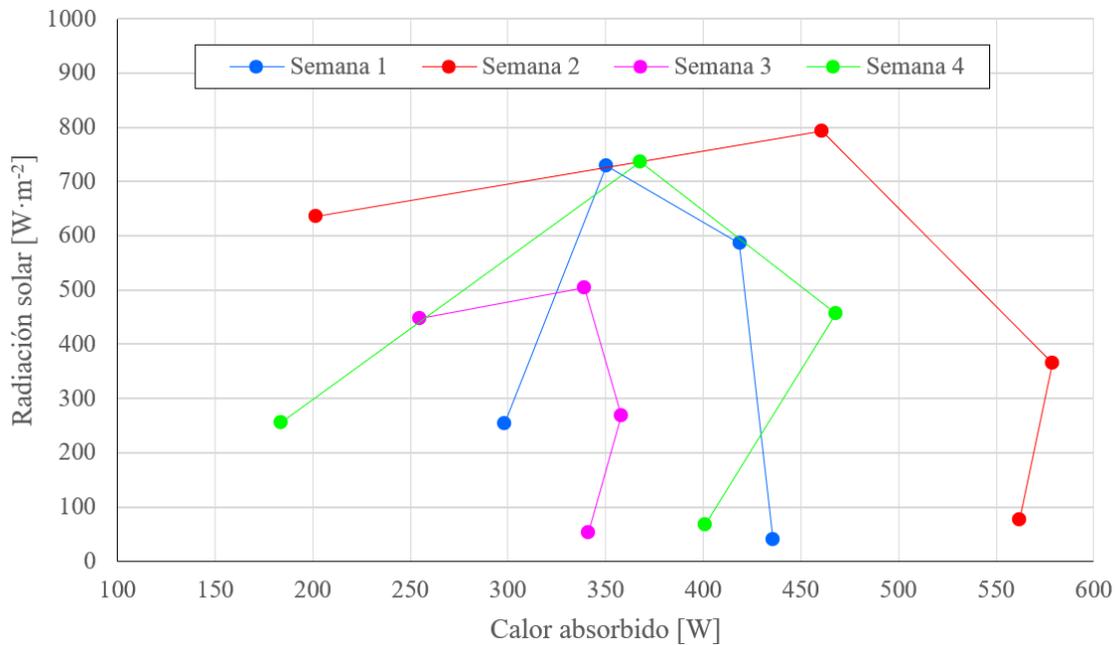


Figura 13. Calor absorbido por el agua respecto a la radiación.

La figura 14 relaciona el impacto del nivel de radiación sobre la eficiencia del colector, donde esta depende de la cantidad de radiación disponible, por lo que cuando se dispone de menos radiación, la eficiencia del colector va a aumentar. El máximo valor de eficiencia se alcanzó en la semana 3, con un promedio de 64.31 %, mientras que la menos eficiencia fue en la semana 1, con 49.17 %.

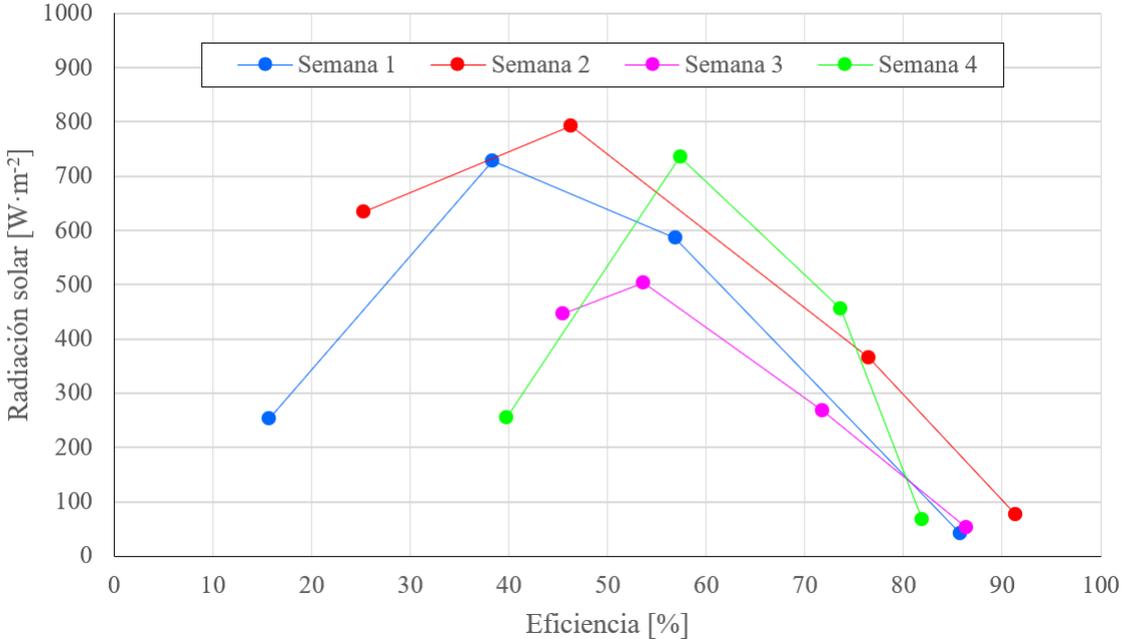


Figura 14. Eficiencia del colector respecto a la radiación.

CAPÍTULO IV ANÁLISIS ECONÓMICO

4.1 Costos de los componentes

La tabla 8 presenta el listado de los componentes principales, las características y cantidades requeridas para la implementación del sistema.

Tabla 8. Costos de los componentes del sistema

Descripción	Cantidad	Costo [USD]
Colector solar de tubos de vacío	10 tubos	350
Tanque de almacenamiento de 150 L	1 unidad	250
Estructura de soporte	1 unidad	150
Tuberías de conexión PVC Ø 12.7 mm	45 – 80	60
Válvula de retención	1 unidad	15
Válvula de sobrepresión	1 unidad	15
Termómetro	1 unidad	10
Conexiones y adaptadores	1 unidad	30
	TOTAL	850

4.2 Comparativa entre sistemas de calentamiento de agua

El Gas Licuado de Petróleo (GLP) se utiliza comúnmente para calentar agua en Ecuador. Los calentadores de gas son una opción popular debido a su costo inicial relativamente bajo y a su capacidad para calentar grandes volúmenes de agua rápidamente. El costo de calentar agua con GLP depende del consumo de gas y del precio del GLP, además de considerar que localmente se cuenta con un subsidio en el precio de venta doméstico. Un calentador a gas utiliza aproximadamente 0.2 kg de GLP por cada 10 L de agua caliente. Si se requiere 150 L de agua caliente al día, entonces:

$$150 \text{ L} \cdot \frac{0.2 \text{ kg}}{10 \text{ L}} = 3 \text{ kg}_{GLP}$$

En Ecuador, el precio del GLP puede variar, pero un costo aproximado sin subsidio es

USD 1.20 por kg. Entonces, el costo diario de utilizar GLP sería:

$$3 \text{ kg}_{GLP} \cdot USD 1.20 = USD 3.60 / \text{día}$$

El costo mensual para los 30 días es:

$$\frac{USD 3.60}{\text{día}} \cdot 30 \text{ días} = USD 108 / \text{mes}$$

Los calentadores eléctricos también son una opción popular para calentar agua en hogares ecuatorianos. El costo de operación de un calentador eléctrico depende del consumo energético del calentador y del precio de la electricidad. Un calentador eléctrico genera potencia de 2 kW y consume aproximadamente 1 kW·h por cada 50 L de agua caliente. Para calentar 180 litros de agua, el cálculo sería el siguiente:

$$150 \text{ L} \cdot \frac{1 \text{ kW} \cdot \text{h}}{50 \text{ L}} = 3 \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{día}$$

En Ecuador, el costo promedio de electricidad es aproximadamente USD 0.10 por kW·h. Entonces, el costo diario de utilizar un calentador eléctrico sería:

$$3 \text{ kW} \cdot \text{h} (USD 0.10) = USD 0.30 / \text{día}$$

El costo mensual para los 30 días es:

$$\frac{USD 0.30}{\text{día}} \cdot 30 \text{ días} = USD 9 / \text{mes}$$

Como se puede observar, el costo mensual de calentamiento de agua con GLP es significativamente más alto que con un calentador eléctrico. El calentador eléctrico es mucho más económico, con un costo mensual de aproximadamente USD 9, en comparación con los USD 108 mensuales de los calentadores a GLP.

4.3 Valor actual neto y tasa interna de retorno

Responde a indicadores que evalúan la factibilidad financiera del plan en relación con los costos y beneficios. Entonces, se ha considerado el costo de implementación de USD 850 como valor inicial del sistema, que se estima tendrá una vida útil de 10 años. También se evidenció el ahorro

estimado anual en consumo de GLP y energía eléctrica, si el sistema de calentador solar reemplaza el consumo de un sistema de calefón a GLP o eléctrico, con un ahorro anual de energía. Por lo que, de manera general, se estima un ahorro de USD 150 anuales, considerando un costo promedio de USD 0.80 por metro cúbico de GLP y un costo promedio de energía eléctrica de USD 0.25 por kW·h. La tasa de descuento a utilizarse es del 8 %, que es representativa de la tasa de rendimiento esperado en inversiones en Ecuador y la inflación de costos o ahorros del 3% anual, lo que afecta los ahorros generados por el sistema. Por lo tanto, el valor actual neto (VAN) es calculado como:

$$VAN = \sum \left(\frac{\text{Ahorro anual}}{(1+r)^t} \right) - \text{costo inicial} \quad (16)$$

Donde:

r : Tasa de descuento anual (8 %)

t : Número de años (10 años)

De esta manera, una estimación aproximada permite obtener un VAN de USD 156.52. El valor positivo del VAN sugiere que el sistema es financieramente viable, ya que los ahorros generados superan el costo inicial de implementación.

Para calcular la tasa interna de retorno (TIR), es necesario ajustar la tasa de descuento hasta que VAN resulte cero. Por lo tanto, la TIR es el valor de r que satisface la siguiente ecuación:

$$\sum \left(\frac{\text{Ahorro anual}}{(1+TIR)^t} \right) = \text{costo inicial} \quad (17)$$

La TIR hace que el VAN sea igual a cero. Con un valor calculado de USD 156.52, se puede estimar que la TIR es aproximadamente del 12 %. El VAN se define como positivo y la TIR supera el porcentaje de descuento del 8 %; se concluye que este sistema representa una inversión económicamente rentable. La instalación de un calentador solar de 150 L es viable en términos financieros y ofrece ahorro en consumo de electricidad.

CONCLUSIONES

Se analizaron las características fundamentales con respecto a los calentadores solares para agua, específicamente diseñados para cubrir la necesidad de 150 L de agua caliente, suficientes para satisfacer la demanda de un hogar ecuatoriano. Este sistema emplea tubos colectores de calor y un tanque de almacenamiento para captar la radiación solar y calentar el agua, alcanzando temperaturas superiores a los 40 °C, dependiendo de parámetros climáticos. La eficiencia del colector solar depende de la radiación y de la capacidad del sistema para transferir el calor al agua. Se ha comprobado la viabilidad de los calentadores solares como una solución eficiente y sostenible, especialmente en países como Ecuador, donde la radiación solar es abundante, lo que respalda el diseño del proyecto.

El diseño del tanque y la tubería del calentador solar mediante software de diseño mecánico, como *Engineering Equation Solver* (EES), permite predecir el funcionamiento del sistema para garantizar su eficiencia y funcionalidad. Los cálculos realizados mediante codificación muestran que el calor conducido por las tuberías varía significativamente según el material utilizado, siendo los materiales con menor conductividad térmica, como el PVC, de $0.19 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, y el cobre con aislamiento, los que presentan menores pérdidas térmicas. Asimismo, el uso de aislantes como espuma de poliuretano con coeficiente conductivo de $0.02 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, resulta efectivo para reducir pérdidas de calor y mantener la capacidad del sistema. Estos valores destacan la importancia de seleccionar correctamente los materiales y de aprovechar herramientas como EES para evaluar y validar diferentes configuraciones, asegurando así un diseño técnicamente viable, eficiente y alineado con los principios de sostenibilidad energética, de esta manera se pretende disminuir los costos en la elaboración de tanques de almacenamiento.

El funcionamiento del calentador de agua solar fue validado considerando su capacidad para alcanzar temperaturas dentro de 40 °C. A partir de los datos analizados, se determinó que la temperatura media del agua en semanas evaluadas fue de 41.55, 48.02, 49.49 y 49.98 °C, respectivamente, evidenciando que el sistema logró superar el rango establecido, lo cual garantiza su efectividad en climas con buena radiación solar. Además, el calor absorbido por el agua mostró valores destacados, como 435.69 W para la semana 1 y 579.06 W para la

semana 2, lo que refleja el alto aprovechamiento energético del colector solar. Por otro lado, la eficiencia promedio del colector fue de 45.6 % en la semana 1 y alcanzó un máximo de 58.3 % en la semana 2, lo que demuestra un desempeño adecuado al generar calor útil a partir de la radiación incidente.

El análisis económico y financiero demuestra que esta implementación de sistema del calentador solar para 150 L, con un costo inicial de USD 850 y una vida útil de 10 años, es financieramente viable y rentable. Con un ahorro anual estimado de USD 150, un VAN positivo de USD 156.52 y una TIR del 12 %, más alta que la tasa de descuento del 8 %, el sistema permite reducir significativamente los costos energéticos en comparación con calentadores a GLP o eléctricos. Además, ofrece beneficios ambientales al disminuir el consumo de combustibles fósiles, posicionándolo como una inversión sostenible y económicamente atractiva a largo plazo.

RECOMENDACIONES

Aunque es fundamental priorizar el uso de materiales con baja conductividad térmica para mitigar las pérdidas de calor en tuberías y en el tanque de almacenaje, también es aconsejable evaluar los costos de inversión y tener en cuenta el presupuesto previsto.

Se recomienda utilizar y comparar diferentes programas de simulación térmica para validar los resultados obtenidos con EES.

Si bien se realizaron pruebas extendidas durante diferentes etapas del año para analizar el desempeño del sistema en diversas condiciones ambientales, se recomienda utilizar equipos de registro automático de parámetros operacionales y climáticos, como sensores de temperatura.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Q. J. Abdul-Ghafoor, F. A. M. A. Ali, W. K. Hasan, K. A. Hammoodi, and H. S. Majdi, “Enhancing Thermal Efficiency in Solar Water Heaters Using Reflective Mirrors,” *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, vol. 19, no. 1, pp. 31–39, Feb. 2024, doi: 10.18280/IJDNE.190104.
- [2] C. Piselli, C. Balocco, S. Forastiere, A. Silei, F. Scieurpi, and F. Cotana, “Energy efficiency in the commercial sector. Thermodynamics fundamentals for the energy transition,” *Energy Reports*, vol. 11, pp. 4601–4621, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.EGYR.2024.04.033.
- [3] S. Shaaban, “Enhancement of the solar trough collector efficiency by optimizing the reflecting mirror profile,” *Renew Energy*, vol. 176, pp. 40–49, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.RENENE.2021.05.040.
- [4] A. N. A. Saieed, M. H. Alturaihi, L. Jassim, and H. S. Majdi, “Nanomaterials and Phase-Changing Materials in a U Vacuum Tube Solar Collector,” *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, vol. 10, no. 3, pp. 852–860, 2023, doi: 10.18280/MMEP.100315.
- [5] Q. J. Abdul-Ghafoor, F. A. M. A. Ali, W. K. Hasan, K. A. Hammoodi, and H. S. Majdi, “Enhancing Thermal Efficiency in Solar Water Heaters Using Reflective Mirrors,” *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, vol. 19, no. 1, pp. 31–39, Feb. 2024, doi: 10.18280/IJDNE.190104.
- [6] T. Wang, Y. Diao, Y. Zhao, L. Liang, Z. Wang, and C. Chen, “A comparative experimental investigation on thermal performance for two types of vacuum tube solar air collectors based on flat micro-heat pipe arrays (FMHPA),” *Solar Energy*, vol. 201, pp. 508–522, May 2020, doi: 10.1016/J.SOLENER.2020.03.024.
- [7] İ. Aytaç, A. Khanlari, A. D. Tuncer, H. İ. Variyenli, and S. Ünvar, “Performance improvement of a heat pipe evacuated solar water collector using quartz/water nanofluid: A numerical and experimental study,” *Renew Energy*, vol. 236, p. 121423, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.RENENE.2024.121423.
- [8] S. Gorjian, H. Sharon, H. Ebadi, K. Kant, F. B. Scavo, and G. M. Tina, “Recent technical advancements, economics and environmental impacts of floating photovoltaic solar energy conversion systems,” *J Clean Prod*, vol. 278, p. 124285, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.124285.
- [9] O. A. Al-Shahri *et al.*, “Solar photovoltaic energy optimization methods, challenges and issues: A comprehensive review,” *J Clean Prod*, vol. 284, p. 125465, Feb. 2021, doi:

10.1016/J.JCLEPRO.2020.125465.

- [10] M. Carolina, R. Pereira, and A. S. Coria, “Impactos ambientales de sistemas de energía solar fotovoltaica: una revisión de análisis de ciclo de vida y otros estudios,” *Revista EIA*, vol. 19, no. 38, p. 24, 2022, doi: 10.24050/reia.
- [11] A. El Hammoumi, S. Chtita, S. Motahhir, and A. El Ghzizal, “Solar PV energy: From material to use, and the most commonly used techniques to maximize the power output of PV systems: A focus on solar trackers and floating solar panels,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 11992–12010, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.EGYR.2022.09.054.
- [12] L. Kruitwagen, K. T. Story, J. Friedrich, L. Byers, S. Skillman, and C. Hepburn, “A global inventory of photovoltaic solar energy generating units,” *Nature 2021 598:7882*, vol. 598, no. 7882, pp. 604–610, Oct. 2021, doi: 10.1038/s41586-021-03957-7.
- [13] F. A. Filippin, H. J. Fasoli, F. A. Filippin, and H. J. Fasoli, “Sistemas fotofísico y fotoquímico con semiconductores para la conversión de energía solar.,” *Anales (Asociación Física Argentina)*, vol. 32, no. 1, pp. 22–31, 2021, doi: 10.31527/ANALESFAA.2021.32.1.22.
- [14] T. G. Alghamdi, D. Said, and H. T. Mouftah, “Profit Maximization for EVSEs-based Solar Energy in Smart Cities,” *2021 International Wireless Communications and Mobile Computing, IWCMC 2021*, pp. 1575–1580, 2021, doi: 10.1109/IWCMC51323.2021.9498933.
- [15] J. Ma and T. Xu, “Optimal strategy of investing in solar energy for meeting the renewable portfolio standard requirement in America,” *Journal of the Operational Research Society*, vol. 74, no. 1, pp. 181–194, 2023, doi: 10.1080/01605682.2022.2032427.
- [16] D. Lugo-laguna, A. Arcos-Vargas, and F. Nuñez-hernandez, “A European Assessment of the Solar Energy Cost: Key Factors and Optimal Technology,” *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 3238*, vol. 13, no. 6, p. 3238, Mar. 2021, doi: 10.3390/SU13063238.
- [17] S. Faisal Ahmed *et al.*, “Recent progress in solar water heaters and solar collectors: A comprehensive review,” *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 25, p. 100981, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.TSEP.2021.100981.
- [18] M. I. Ismail, N. A. Yunus, and H. Hashim, “Integration of solar heating systems for low-temperature heat demand in food processing industry – A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 147, p. 111192, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.RSER.2021.111192.
- [19] W. Xu, H. Guo, and C. Ma, “An active solar water wall for passive solar greenhouse heating,” *Appl Energy*, vol. 308, p. 118270, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.APENERGY.2021.118270.
- [20] S. Vasanthaseelan *et al.*, “Investigation on solar water heater with different types of

- turbulators,” *Mater Today Proc*, vol. 47, pp. 5203–5208, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.05.530.
- [21] M. Gopinath and R. Marimuthu, “A review on solar energy-based indirect water-splitting methods for hydrogen generation,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 89, pp. 37742–37759, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2022.08.297.
- [22] I. Simbaña, W. Quitiaquez, J. Estupiñán, F. Toapanta-Ramos, and L. Ramírez, “Evaluación del rendimiento de una bomba de calor de expansión directa asistida por energía solar mediante simulación numérica del proceso de estrangulamiento en el dispositivo de expansión,” *Revista Técnica “energía,”* vol. 19, no. 1, pp. 110–119, Jul. 2022, doi: 10.37116/REVISTAENERGIA.V19.N1.2022.524.
- [23] I. Simbaña, W. Quitiaquez, P. Cabezas, and P. Quitiaquez, “Comparative Study of the Efficiency of Rectangular and Triangular Flat Plate Solar Collectors through Finite Element Method,” *Revista Técnica “Energía,”* vol. 20, no. 2, pp. 81–89, 2024, doi: 10.37116/revistaenergia.v20.n2.2024.593.
- [24] I. Simbaña, W. Quitiaquez, L. Ramírez, and D. Saquinga, “Estudio de viabilidad de un sistema de captación de agua lluvia en Guamaní – Quito,” *REVISTA CIENTIFICA UNANCHAY ISSN 2953-6707*, vol. 1, no. 1, pp. 47–63, Dec. 2022, Accessed: Dec. 02, 2023. [Online]. Available: <https://tecnoecuatoriano.edu.ec/revistaunanchay/index.php/RCU/article/view/21/17>
- [25] Z. Rahimi-Ahar and M. S. Hatamipour, “Performance evaluation of a solar and vacuum assisted multi-stage humidification-dehumidification desalination system,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 148, pp. 1304–1314, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.PSEP.2021.03.005.
- [26] W. Quitiaquez, I. Simbaña, C. A. Isaza-Roldán, C. Nieto-Londoño, P. Quitiaquez, and L. Toapanta-Ramos, “Performance Analysis of a Direct-Expansion Solar-Assisted Heat Pump Using a Photovoltaic/Thermal System for Water Heating,” *Communications in Computer and Information Science*, vol. 1154 CCIS, pp. 89–102, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-46785-2_8.
- [27] R. Khargotra, R. Kumar, and S. Kumar, “Impact of perforated shapes in delta type hindrance promoter on thermo-hydraulic performance of solar water heating system (An experimental study),” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 24, p. 100831, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.CSITE.2020.100831.
- [28] I. Simbaña, V. Toaquiza, and W. Quitiaquez, “Diseño y construcción de una bomba de calor asistida por energía solar utilizada para el calentamiento de agua con una capacidad de 60 l/día.”

Accessed: Jan. 06, 2025. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14974/4/UPS-KT01454.pdf>

- [29] F. G. Reina, R. R. Rojas, T. M. Zamora, L. Y. H. Mora, and F. H. Rodríguez, “Eficiencia de conversión de la energía de la radiación solar en energía interna térmica del agua en calentadores solares de tubos al vacío,” *Revista Colombiana de Tecnologías Avanzadas*, vol. 1, no. 37, pp. 59–65, Mar. 2021, doi: 10.24054/RCTA.V1I37.980.
- [30] M. R. Al-Mamun *et al.*, “State-of-the-art in solar water heating (SWH) systems for sustainable solar energy utilization: A comprehensive review,” *Solar Energy*, vol. 264, p. 111998, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.SOLENER.2023.111998.
- [31] J. Zhang, C. Wang, J. Shi, D. Wei, H. Zhao, and C. Ma, “Solar Selective Absorber for Emerging Sustainable Applications,” *Advanced Energy and Sustainability Research*, vol. 3, no. 3, p. 2100195, Mar. 2022, doi: 10.1002/AESR.202100195.
- [32] J. Zhang, C. Wang, J. Shi, D. Wei, H. Zhao, and C. Ma, “Solar Selective Absorber for Emerging Sustainable Applications,” *Advanced Energy and Sustainability Research*, vol. 3, no. 3, p. 2100195, Mar. 2022, doi: 10.1002/AESR.202100195.
- [33] P. K. S. Rathore and B. S. Sikarwar, “Thermal energy storage using phase change material for solar thermal technologies: A sustainable and efficient approach,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 277, p. 113134, Oct. 2024, doi: 10.1016/J.SOLMAT.2024.113134.
- [34] C. C. Kwasi-Effah, “Environmental Impact and Sustainability of Thermal Energy Storage in Concentrated Solar Power Systems,” *NIPES - Journal of Science and Technology Research*, vol. 1, no. 10, pp. 2024–2054, Nov. 2024, doi: 10.5281/ZENODO.14020637.
- [35] P. K. Kushwaha, N. K. Sharma, A. Kumar, and C. S. Meena, “Recent Advancements in Augmentation of Solar Water Heaters Using Nanocomposites with PCM: Past, Present, and Future,” *Buildings 2023, Vol. 13, Page 79*, vol. 13, no. 1, p. 79, Dec. 2022, doi: 10.3390/BUILDINGS13010079.
- [36] L. A. Omeiza *et al.*, “Application of solar thermal collectors for energy consumption in public buildings – An updated technical review,” *Journal of Engineering Research*, vol. 12, no. 4, pp. 994–1010, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.JER.2023.09.011.
- [37] G. Marques Humia, W. Moreira Duarte, J. Jose Garcia Pabon, T. de Freitas Paulino, and L. Machado, “Experimental study and simulation model of a direct expansion solar assisted heat pump to CO₂ for water heating: Inventory, coefficient of performance and total equivalent warming impact,” *Solar Energy*, vol. 230, pp. 278–297, Dec. 2021, doi:

10.1016/J.SOLENER.2021.10.018.

- [38] S. Sikiru, T. L. Oladosu, T. I. Amosa, S. Y. Kolawole, and H. Soleimani, “Recent advances and impact of phase change materials on solar energy: A comprehensive review,” *J Energy Storage*, vol. 53, p. 105200, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.EST.2022.105200.
- [39] I. R. Nanda, N. A. Pambudi, and M. Aziz, “Review on the Progress of Solar Water Heaters and Their Future Perspectives,” *Energy Technology*, vol. 11, no. 10, p. 2300191, Oct. 2023, doi: 10.1002/ENTE.202300191.
- [40] S. Goldstein, T. Hara, and H. Tasaki, “The second law of thermodynamics for pure quantum states,” vol. 2, Mar. 2013, Accessed: Jan. 06, 2025. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1303.6393>
- [41] B. Kayser and S. Verges, “Hypoxia, energy balance, and obesity: An update,” *Obesity Reviews*, vol. 22, no. S2, p. e13192, Mar. 2021, doi: 10.1111/OBR.13192.
- [42] R. Deberdt and P. Le Billon, “Outer Space Mining: Exploring Techno-Utopianism in a Time of Climate Crisis,” *Ann Am Assoc Geogr*, vol. 113, no. 8, pp. 1878–1899, 2023, doi: 10.1080/24694452.2023.2201339.
- [43] S. Castelletto and A. Boretti, “Luminescence solar concentrators: A technology update,” *Nano Energy*, vol. 109, p. 108269, May 2023, doi: 10.1016/J.NANOEN.2023.108269.
- [44] N. Schörghofer and S. Khatiwala, “Semi-implicit Solver for the Heat Equation with Stefan–Boltzmann Law Boundary Condition,” *Planet Sci J*, vol. 5, no. 5, p. 120, May 2024, doi: 10.3847/PSJ/AD4351.
- [45] J. Wang, Z. Han, Y. Liu, X. Zhang, and Z. Cui, “Thermodynamic analysis of a combined cooling, heating, and power system integrated with full-spectrum hybrid solar energy device,” *Energy Convers Manag*, vol. 228, p. 113596, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2020.113596.
- [46] H. K. Ghritlahre, M. Verma, J. S. Parihar, D. S. Mondloe, and S. Agrawal, “A detailed review of various types of solar air heaters performance,” *Solar Energy*, vol. 237, pp. 173–195, May 2022, doi: 10.1016/J.SOLENER.2022.03.042.
- [47] A. Arabkoohsar and M. Sadi, “Thermodynamics, economic and environmental analyses of a hybrid waste–solar thermal power plant,” *J Therm Anal Calorim*, vol. 144, no. 3, pp. 917–940, May 2021, doi: 10.1007/S10973-020-09573-3/METRICS.
- [48] M. Muñoz, A. Rovira, and M. J. Montes, “Thermodynamic cycles for solar thermal power plants: A review,” *Wiley Interdiscip Rev Energy Environ*, vol. 11, no. 2, p. e420, Mar. 2022,

doi: 10.1002/WENE.420.

- [49] A. S. Alsagri, “Thermodynamic Investigation of a Photovoltaic/Thermal Heat Pipe Energy System Integrated with Phase Change Material,” *Arab J Sci Eng*, vol. 49, no. 2, pp. 2625–2643, Feb. 2024, doi: 10.1007/S13369-023-08362-Y/METRICS.
- [50] H. Karami *et al.*, “Thermodynamic Evaluation of the Forced Convective Hybrid-Solar Dryer during Drying Process of Rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) Leaves,” *Energies 2021, Vol. 14, Page 5835*, vol. 14, no. 18, p. 5835, Sep. 2021, doi: 10.3390/EN14185835.
- [51] Y. J. Song, B. Li, C. Y. Zhang, W. W. Wang, F. Y. Zhao, and J. H. Guo, “Solar Photo-Voltaic and thermal (PVT) system facilitated with novel coaxial condensing heat pipe (CCHP): Thermo hydrodynamic modelling and parametric optimization for overall operation performance,” *Solar Energy*, vol. 264, p. 112019, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.SOLENER.2023.112019.

ANEXOS

Anexo 1. Proceso de construcción

Para el funcionamiento del calentador solar de tubos de vacío, en primer lugar, se determina la distribución principal de agua fría y se alimenta por la parte superior al termo tanque, donde va entrando el agua fría, llenando también los tubos de cristal de boro-silicato, los cuales captan la radiación solar, el agua incrementa su temperatura debido al proceso de efecto invernadero. Posteriormente, el agua caliente, que es menos densa que el agua fría sube y se aloja en la parte superior del termo tanque; la salida del agua caliente del tanque viene en la parte superior y sale a todos los servicios necesarios (duchas, lavamanos). El tanque tiene varios elementos como el jarro de aire, su estructura y sus tubos de cristal de boro-silicato. Los tubos de cristal vienen al vacío y tienen por dentro un elemento que se conoce como nitrito de aluminio, el cual capta la radiación solar y la transmite al agua en forma de calor; entonces el agua caliente sube y se aloja en el tanque para distribuir a sus servicios. El jarro de aire sirve para liberar la diferencia de presión que tiene el agua. A continuación, se presentan ciertas fotografías de la instalación del CSTV.



Armado de estructura de soporte de termo tanque



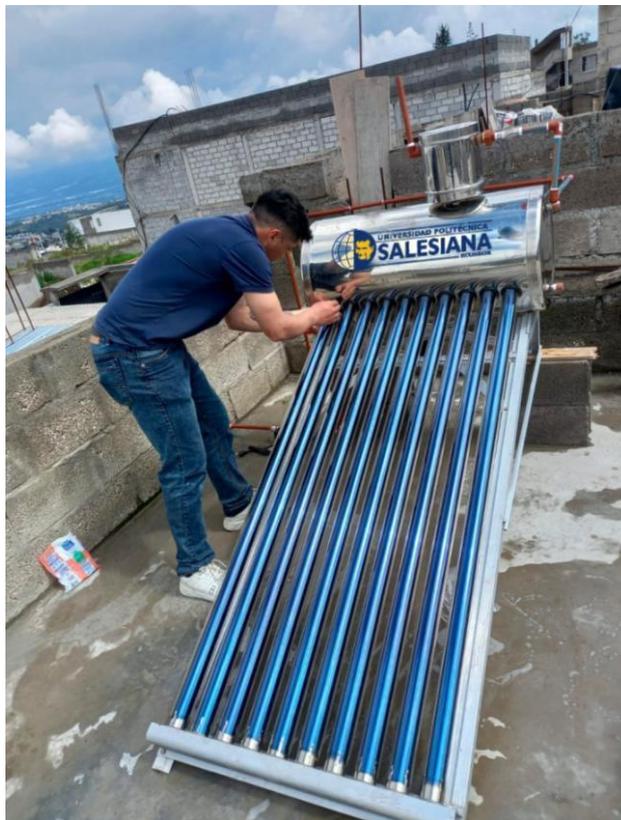
Colocacion de tanque de asistencia de llenado



Colocación de termo tanque sobre estructura



Colocación de termo tanque sobre estructura y de tubos de vacío



Colocación de cauchos de guardapolvos y ajuste en entrada de los tubos al tanque



Salida de agua caliente y colocación de bomba de presión de agua