



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS
RENOVABLES**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

**“CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO AUTOMATIZADO DE
CALENTAMIENTO DE AGUA MEDIANTE ENERGÍA SOLAR
PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título en Ingeniería en
Energías Renovables

Línea de investigación: Biotecnología, energía y recursos
naturales renovables

AUTOR:

Christian Andrés Herrera Martínez

DIRECTOR

Ing. Luis Hernán Álvarez Játiva

Ibarra – Ecuador 2026



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	0401954094		
APELLIDOS Y NOMBRES:	HERRERA MARTÍNEZ CHRISTIAN ANDRÉS		
DIRECCIÓN:	IBARRA		
EMAIL:	caherreram1@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELF. MOVIL	0998359368
DATOS DE LA OBRA			
TÍTULO:	CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO AUTOMATIZADO DE CALENTAMIENTO DE AGUA MEDIANTE ENERGÍA SOLAR PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES		
AUTOR:	HERRERA MARTÍNEZ CHRISTIAN ANDRÉS		
FECHA: DD/MM/AAAA	07/1/2026		
SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN			
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO	<input type="checkbox"/> POSGRADO	
TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES		
DIRECTOR:	Luis Hernán Álvarez Játiva		

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de esta y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 7 días del mes de enero de 2026

EL AUTOR:

(f)

Nombre: Christian Andrés Herrera Martínez

CERTIFICACIÓN DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTERGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 7 de enero de 2026

Ing. Luis Hernán Álvarez Játiva MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f)

Ing. Luis Hernán Álvarez Játiva
MSc.

C.C.: 1002273678

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del Trabajo de Integración Curricular “CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO AUTOMATIZADO DE CALENTAMIENTO DE AGUA MEDIANTE ENERGÍA SOLAR PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES” elaborado por Herrera Martínez Christian Andrés, previo a la obtención del título de Ingeniero en Energías Renovables, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

(f):.....
TUTOR: Ing. Luis Hernán Álvarez Játiva MSc.
C.C. 1002273678

(f):.....
ASESOR: Ing. Daniel Sono Toledo PhD.
C.C.: 1714331913

(f):.....
BIOMETRISTA: Ing. Juan Carlos García PhD.
C.C.: 1002279535

DEDICATORIA

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mi familia, quienes con su amor, apoyo incondicional y sabios consejos han sido mi mayor fortaleza en cada etapa de mi formación. Su confianza en mí ha sido el motor que me ha impulsado a superar cada desafío y a seguir adelante con determinación y perseverancia.

A la Universidad Técnica del Norte, extendiendo mi gratitud por brindarme la oportunidad de crecer tanto académica como personalmente, gracias a ella he adquirido conocimientos, valores y experiencias que usaré para forjar un futuro como profesional. Cada enseñanza recibida será un pilar fundamental en mi camino, aquel aprendizaje que recibí de los docentes de la carrera de Energías Renovables, en especial de mi tutor, el Ing. Luis Álvarez, cuya paciencia, apoyo y guía me permitieron culminar este trabajo. Su dedicación no solo me ayudó en este proyecto, sino que también dejó una huella imborrable en mi formación, inspirándome a seguir aprendiendo con pasión.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi agradecimiento eterno a mis amados padres y hermanos, los cuales se han convertido en un soporte esencial en mi vida. En las situaciones más retadoras, su apoyo firme y su amor sin condiciones han sido mi mayor fortaleza. Cada sacrificio que realizaron, cada palabra de aliento y cada acto de comprensión me brindaron el estímulo que necesitaba para continuar con firmeza.

Mis padres, que con su ejemplo de esfuerzo, perseverancia y dedicación me han enseñado a valorar cada experiencia, desde los pequeños momentos hasta los logros más significativos. Gracias a su guía y sabiduría, he aprendido a enfrentar los desafíos con valentía y a nunca rendirme ante las adversidades. Su confianza en mí ha sido la luz que me ha guiado en este camino, dándome la seguridad para perseguir mis sueños y alcanzar mis metas.

A todos ellos, les debo no solo mis logros, sino también la persona en la que me he convertido.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar y construir un módulo automatizado de calentamiento de agua mediante energía solar para el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Técnica del Norte. Esto necesitó del desarrollo de un sistema que integra colectores solares de placa plana, un termotanque con aislamiento térmico, sensores de temperatura, así como de nivel, y un sistema de control basado en los programas Arduino y LabVIEW. En la metodología se incluyó un diseño mecánico y electrónico, la selección de materiales y componentes como también estrategias de monitoreo y control. Además, se realizaron pruebas para evaluar la eficiencia del sistema en distintas condiciones de radiación solar, asegurando un buen funcionamiento y rendimiento. Los resultados muestran que la automatización mejora la captación y aprovechamiento de la energía solar, permitiendo una regulación del calentamiento de agua. Así, este proyecto contribuye a la educación y la investigación en temas de energías renovables, dándonos una solución sostenible y replicable para aplicaciones a distintas escalas.

Palabras clave: Energía solar, energías renovables, calentamiento de agua, automatización, colectores solares, eficiencia, Arduino, LabVIEW.

ABSTRACT

The purpose of this work is to design and build an automated solar-powered water-heating module for the Renewable Energy Laboratory at the Technical University of the North. This required developing a system that integrates flat-plate solar collectors, a thermally insulated storage tank, temperature and level sensors, and a control system based on Arduino and LabVIEW software. The methodology included both mechanical and electronic design, the selection of materials and components, and the implementation of monitoring and control strategies. In addition, tests were carried out to evaluate the system's efficiency under different solar radiation conditions, ensuring proper operation and performance. The results show that automation enhances the capture and use of solar energy, allowing regulated water heating. This project therefore contributes to education and research in renewable energy, providing a sustainable and replicable solution for applications at different scales.

Keywords: Solar energy, renewable energy, water heating, automation, solar collectors, efficiency, Arduino, LabVIEW.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Problema de investigación.....	1
1.2 Justificación.....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Preguntas de investigación.....	5
1.5 Hipótesis.....	5
CAPÍTULO II.....	6
MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 Historia de los calentadores solares de agua.....	6
2.2 Situación de los calentadores solares de agua en el mundo y en Ecuador.....	6
2.3 Tipos de calentadores solares de agua.....	7
2.3.1 Calentadores solares de agua de tubos de vacío.....	7
2.3.2 Calentadores solares de placa plana.....	7
2.3.3 Calentadores solares de concentración.....	7
2.3.4 Calentadores solares termodinámicos.....	8
2.4 Efecto termosifón.....	8
2.5 Principios de termodinámica y transferencia de calor en calentadores solares.....	8
2.6 Tecnologías de captación, almacenamiento térmico y control automatizado.....	9
2.7 Integración de sistemas automatizados y monitoreo en el diseño de calentadores solares de agua.....	14
2.8 Evaluación y simulación de la eficiencia térmica en sistemas solares de calentamiento de agua.....	17
2.9 Normativa internacional aplicable a sistemas solares térmicos.....	19
2.9.1 Normas internacionales (ISO) aplicables a colectores.....	19

2.9.2 Normativa ecuatoriana y requisitos de construcción / instalaciones (NEC, NTE-INEN).....	20
CAPÍTULO III	21
MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
3.1 Área de estudio	21
3.2 Métodos	22
3.2.1 Diseño de subsistemas mecánicos del módulo automatizado de calentamiento de agua mediante energía solar	22
3.2.2 Diseño de subsistema electrónico del módulo automatizado de calentamiento de agua mediante energía solar	35
3.2.3 Metodología de la construcción	41
3.2.4 Evaluación de la Eficiencia del Módulo Automatizado.....	45
3.3 Listado completo de materiales, componentes y equipos utilizados en la construcción del módulo automatizado.	46
3.3.1 Materiales mecánicos	46
3.3.2 Materiales Hidráulicos (PVC y accesorios)	47
3.3.3 Componentes electrónicos.....	48
3.3.4 Herramientas y consumibles de fabricación.....	48
3.3.5 Software utilizado	49
CAPÍTULO IV	50
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
4.1 Evaluación comparativa de calentadores solares.....	50
4.2 Análisis técnico del subsistema mecánico	51
4.2.1 Masa del agua almacenada en el termotanque	51
4.2.2 Relación volumen–dimensiones del tanque cilíndrico.....	51
4.2.3 Presión hidrostática en el tanque	52
4.2.4 Espesor mínimo del acero inoxidable del tanque.....	52
4.2.5 Resistencia térmica del aislamiento de lana de vidrio.....	53
4.2.6 Diseño del serpentín de cobre	54
4.2.7 Placa colectora.....	57
4.3 Análisis técnico del subsistema electrónico.....	60
4.3.1 Simulación del sistema de control de nivel en Proteus	60
4.3.2 Simulación del sistema de monitoreo de temperatura en Proteus.....	61

4.3.3 Implementación real del sistema de visualización y control electrónico	62
4.3.5 Interfaz de visualización en LabVIEW	63
4.4 Análisis de las Muestras de Temperatura	65
4.5 Prueba de Normalidad de la Temperatura de Salida del Agua	69
4.6 Prueba de Normalidad de la Temperatura de Entrada del Agua.....	70
4.7 Prueba t de Student para la Temperatura de Entrada y Salida del Agua	72
4.8.1 Eficiencia Térmica y Radiación Solar.....	73
4.8.2 Desempeño del Subsistema Mecánico	74
4.8.3 Control Automatizado y Monitoreo	74
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
5.1. Conclusiones	75
5.2. Recomendaciones	76
Bibliografía.....	78

Índice de tablas

Tabla 1	Evaluación del peso específico de cada criterio de la selección alternativa....	22
Tabla 2	Insolación global	29
Tabla 3	Características técnicas de las termocuplas tipo K y módulo MAX6675	36
Tabla 4	Especificaciones del sensor de nivel tipo F	38
Tabla 5	Especificaciones de las pantallas LCD 16x2.....	40
Tabla 6	Materiales mecánicos utilizados en la construcción del módulo automatizado de calentamiento de agua.....	46
Tabla 7	Materiales hidráulicos utilizados en las conexiones y el circuito de agua del sistema	47
Tabla 8	Componentes electrónicos utilizados para el control y monitoreo del sistema	48
Tabla 9	Herramientas y consumibles utilizados durante la fabricación del módulo	48
Tabla 10	Software empleado en el diseño, modelado y monitoreo del módulo automatizado.....	49
Tabla 11	Evaluación de calentadores solares	50

Índice de figuras

Figura 1	Calentador solar de Kemp.....	6
Figura 2	Demostración del sistema solar de calentamiento de agua con controladores.....	10
Figura 3	Análisis térmico	11
Figura 4	Descripción del diseño de control.....	15
Figura 5	Monitoreo y evaluación de la eficiencia del sistema	17
Figura 6	Sensores para monitoreo	19
Figura 7	Mapa de ubicación	21
Figura 8	Insolación global promedio de Ecuador.....	29
Figura 9	Colector placa plana tipo sánduche.....	31
Figura 10	Eficiencia según espaciamiento	32
Figura 11	Tubería soldada a la placa plana	32
Figura 12	Modelo de calentador solar de placa plana	34
Figura 13	Planos hidráulicos del sistema	35
Figura 14	Termocupla tipo K Con Modulo Max6675	36
Figura 15	Sensor nivel de agua horizontal tipo F.....	37
Figura 16	Válvula solenoide de 12V	39
Figura 17	Pantalla LCD 16x2	40
Figura 18	Construcción del termostato	53
Figura 19	Aislamiento térmico en el tanque	53
Figura 20	Serpentín de cobre.....	57
Figura 21	Construcción del colector plano.....	59
Figura 22	Calentador solar plano terminado	59
Figura 23	Simulación en Proteus del control de nivel de agua	60
Figura 24	Simulación del sistema de temperatura.....	61
Figura 25	Sistema de visualización y control.....	63
Figura 26	Interfaz de LabVIEW	64
Figura 27	Diagrama de bloques en LabVIEW	64
Figura 28	Registro de la temperatura vs el tiempo (día 11/7/2025)	66
Figura 29	Registro de la temperatura vs el tiempo (día 14/7/2025)	67
Figura 30	Registro de la temperatura vs el tiempo (día 15/7/2025)	68
Figura 31	Registro de la temperatura vs el tiempo (día 16/7/2025)	69
Figura 32	Resultados de la prueba de normalidad de Anderson-Darling para la temperatura de salida del agua (T_SALIDA), generados en Minitab.	70
Figura 33	Resultados de la prueba de normalidad de Anderson-Darling para la temperatura de entrada del agua (T_ENTRADA) del calentador solar.....	71
Figura 34	Comparación de la temperatura de entrada y salida del agua en el calentador solar mediante la prueba t de Student.....	73

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

En esta sección se detallan la problemática, la justificación de la investigación y sus objetivos. Asimismo, se presentan las preguntas de investigación e hipótesis que constituyen el eje central de la investigación.

1.1 Problema de investigación

La transición energética hacia fuentes renovables sigue siendo un desafío global, y en países como Ecuador, este proceso se ve dificultado por la falta de políticas públicas eficaces que promuevan el uso de energías solares. Aunque Ecuador cuenta con un potencial significativo de energía solar, la infraestructura y la educación en el uso de tecnologías renovables siguen siendo limitadas. Además, la carencia de incentivos gubernamentales adecuados para la instalación de sistemas solares térmicos impide su expansión. Esto es especialmente evidente en el sector educativo, donde los laboratorios de energías renovables carecen de sistemas de calentamiento solar de agua automatizados, que podrían servir como herramientas educativas clave (Golla & Gerke, 2018).

En Latinoamérica si se deseara promover el uso de calentadores solares convencionales para este fin, se observa que la inversión inicial de estos sistemas es varias veces superior a la de los sistemas de calefacción a gas (entre 3 y 10 veces) o eléctricos (entre 4 y 20 veces). Esto evita propuestas de inversión, a pesar del ahorro de energía que se genera a largo plazo (Solar Reviews, 2024).

Una de las grandes ventajas de Ecuador en cuanto a energía renovable es su ubicación geográfica, según las mediciones satelitales de la NASA Surface Meteorology and Solar Energy, la radiación solar global diaria promedio en la capital (Quito) es de

4,25 kWh/m²/día. En comparación con algunos países europeos, estos no superan un promedio de 2 kWh/m²/día a lo largo de todo el año. En Ecuador, aproximadamente 300,000 hogares utilizan calefones a gas licuado de petróleo (GLP), lo que le cuesta al Estado entre 52,2 y 74,5 millones de dólares anuales en subsidios, con una tendencia al alza. Por ello, una de las alternativas más prometedoras para reemplazar los combustibles derivados del petróleo en el calentamiento de agua es el uso de calentadores solares (Pesántez, 2012).

La implementación de sistemas de energía solar térmica en ambientes educativos presenta limitaciones. Los laboratorios de energías renovables en diversas instituciones educativas carecen de equipos automatizados que permitan a los estudiantes interactuar con sistemas reales para el calentamiento de agua. Esta carencia afecta la formación práctica en cuanto a la comprensión y el manejo de tecnologías solares (Guzmán et al., 2017).

En la Universidad Técnica del Norte, específicamente en el Laboratorio de Energías Renovables ubicado en el campus El Olivo de la ciudad de Ibarra, provincia de Imbabura, a una altitud aproximada de 2207 m s. n. m., no se dispone de un módulo didáctico automatizado que permita estudiar de manera práctica el funcionamiento de un sistema solar térmico. A pesar de que la zona presenta niveles de radiación solar entre 4.5 y 5.5 kWh/m² a lo largo del año, el laboratorio únicamente cuenta con equipos básicos de medición y no integra un sistema real que combine captación solar, almacenamiento, sensores de temperatura y nivel, ni un sistema de control y monitoreo digital. Esta brecha tecnológica limita el desarrollo de prácticas experimentales, así como la validación de modelos térmicos y estrategias de control aplicadas a colectores solares. Por lo tanto, surge la necesidad de diseñar y construir un módulo automatizado que permita cubrir esta

carencia y fortalecer las capacidades de formación e investigación en energía solar térmica.

1.2 Justificación

La transición hacia fuentes de energía sostenibles es un eje principal en la lucha contra el cambio climático y la creciente demanda energética. Para esto, la energía solar se destaca como una de las principales soluciones, como se menciona en la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, 2021) la cual estima que la energía solar podría satisfacer más de la mitad de la demanda global en las próximas décadas, haciendo notoria la necesidad de desarrollar tecnologías que optimicen su uso (Shell, 2022).

El calentamiento de agua representa un porcentaje importante del consumo energético en residencias, comercios e industrias. El programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2015) menciona que los sistemas convencionales dependen en gran medida de combustibles fósiles, contribuyendo a las emisiones de gases de efecto invernadero, en cambio, los sistemas solares térmicos pueden reducir el uso de energía convencional en un 70%. También cabe recalcar que los costos operativos de los sistemas solares son generalmente más bajos que los de los sistemas de combustibles fósiles, permitiendo un ahorro en las facturas de energía (Luzergia, 2024).

Ecuador no se vuelve una excepción en el calentamiento de agua ya que representa gran parte del consumo energético residencial, en donde predominan métodos eléctricos ineficientes y costosos (Pesántez, 2012). Según Guamán et al. (2016), el 25% de la electricidad en los hogares ecuatorianos lo consumen los sistemas de calentamiento de agua, lo que incrementa tanto el gasto económico como la carga sobre el sistema eléctrico nacional. La implementación de sistemas solares para el calentamiento de agua en el país

no solo reduciría la dependencia de la electricidad, sino que también contribuiría a una meta nacional que es el disminuir las emisiones de carbono en un 20% para 2025.

El desarrollo de un módulo automatizado para el calentamiento de agua usando energía solar, permite tener un control más preciso mejorando la eficiencia energética del sistema. Según Santillán (2022), los sistemas automatizados pueden optimizar el rendimiento de entre un 15% a 25% al ajustar el caudal y la temperatura del agua según la radiación solar disponible, aumentando la capacidad de adaptación la cual permite capturar mayor energía solar, ofreciendo un suministro constante de agua caliente.

Al implementar un módulo automatizado de calentamiento de agua mediante energía solar a un contexto educativo y de investigación, se generan beneficios tanto a nivel formativo como ambiental desde el momento de realizar el diseño hasta la construcción de este. De esta forma, incentivando al uso eficiente de la energía solar y apoyando al desarrollo de tecnologías limpias se fomenta el aprendizaje práctico en un área de creciente importancia en la transición hacia un futuro energético sostenible.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Construir un módulo automatizado de calentamiento de agua mediante energía solar, para el Laboratorio de Energías Renovables en la Universidad Técnica del Norte.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Diseñar los subsistemas mecánicos y electrónicos del módulo automatizado de calentamiento de agua mediante energía solar.
- Construir el módulo automatizado, mediante los subsistemas mecánicos y electrónicos diseñados.

- Evaluar la eficiencia del módulo automatizado, mediante pruebas que midan su rendimiento bajo diferentes condiciones controladas.

1.4 Preguntas de investigación

¿Qué parámetros mecánicos, térmicos y electrónicos deben considerarse para diseñar un módulo automatizado de calentamiento de agua por energía solar adecuado para las condiciones operativas del Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Técnica del Norte?

¿Cómo influye la automatización en el rendimiento térmico del módulo en comparación con un sistema no automatizado?

1.5 Hipótesis

1.5.1. Hipótesis nula (H_0)

El módulo automatizado de calentamiento de agua mediante energía solar no presenta una eficiencia significativa bajo diferentes condiciones controladas.

1.5.2 Hipótesis alternativa (H_a)

El módulo automatizado de calentamiento de agua mediante energía solar presenta una eficiencia significativa bajo diferentes condiciones controladas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

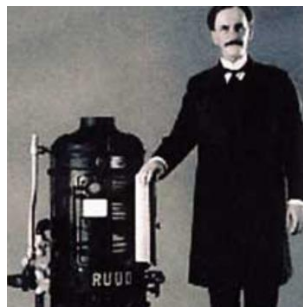
En este apartado se presenta la información de referencia sobre el diseño, construcción y evaluación de un módulo automatizado para el calentamiento de agua mediante energía solar.

2.1 Historia de los calentadores solares de agua

En 1881, Clarence Kemp diseñó y fabricó un sistema de calentadores solares de agua, el cual fue patentado bajo el nombre de "Climas" como se muestra en la figura 1. Este dispositivo consistía en un tanque de hierro galvanizado con un recubrimiento interior en negro mate, colocado dentro de una caja de madera con una tapa de vidrio. El sistema podía conectarse directamente a las tuberías de agua de las viviendas. Sin embargo, uno de los principales inconvenientes de estos colectores era el almacenamiento del calor, ya que el agua caliente acumulada solo estaba protegida por un cristal, lo que provocaba que la energía térmica captada durante el día se disipara durante la noche (Sanchez & Lara, 2012).

Figura 1

Calentador solar de Kemp



Nota. Primer calentador solar de agua patentado como "Clima", obtenido de (Sanchez & Lara, 2012).

2.2 Situación de los calentadores solares de agua en el mundo y en Ecuador

A nivel mundial, su adopción ha crecido significativamente, especialmente en regiones con alta radiación solar. En Argentina, por ejemplo, se ha identificado un potencial superior a los 6 millones de metros cuadrados en el sector residencial para la

producción de agua caliente sanitaria. Sin embargo, desafíos como la competencia de productos importados de bajo costo y la necesidad de mejoras en la calidad de los sistemas locales persisten. La implementación de incentivos adicionales y la obligación de utilizar energía solar se consideran medidas esenciales para promover su uso (Björn Nienborg, 2010).

En Ecuador, la adopción de calentadores solares de agua ha sido limitada, a pesar de las condiciones climáticas favorables. Un estudio de 2015 señala que la falta de políticas públicas y de incentivos económicos ha obstaculizado su implementación en el país. Sin embargo, se reconoce que el uso de estos sistemas podría reducir significativamente el consumo de energía eléctrica en el sector residencial (Calle et al., 2010).

2.3 Tipos de calentadores solares de agua

2.3.1 Calentadores solares de agua de tubos de vacío

Los calentadores solares de agua de tubos de vacío son sistemas eficientes que utilizan tubos de vidrio al vacío para capturar la energía solar y calentar el agua. Estos tubos están diseñados para minimizar las pérdidas de calor, lo que los hace ideales para climas fríos o con poca radiación solar. El agua circula a través de los tubos, donde se calienta y luego se almacena en un tanque térmico. Este tipo de calentador es popular en aplicaciones residenciales y comerciales debido a su alta eficiencia y durabilidad (Caminos et al., 2010).

2.3.2 Calentadores solares de placa plana

Los calentadores solares de placa plana son uno de los sistemas más comunes y económicos para calentar agua utilizando energía solar. Consisten en una placa absorbente de metal, generalmente cubierta con un material selectivo para maximizar la absorción de calor, y un conjunto de tuberías por donde circula el agua. Estos sistemas son ideales para climas cálidos y soleados, ya que su diseño simple permite un mantenimiento mínimo. Sin embargo, pueden ser menos eficientes en condiciones de baja radiación solar (Gomes, 2017).

2.3.3 Calentadores solares de concentración

Estos calentadores utilizan varios espejos o también llamados lentes para focalizar la radiación solar en un área pequeña, de esta forma aumenta la temperatura del agua,

aunque estos sistemas son más complejos y costosos que los de placa plana o tubos de vacío, pero son más eficientes en aplicaciones industriales donde se requiere agua a temperaturas más altas, diseños como estos permiten que el sistema alcance temperaturas superiores a los 100°C, lo que los hace adecuados para procesos térmicos especializados (Rivera & Fernández, 2010).

2.3.4 Calentadores solares termodinámicos

Los calentadores solares termodinámicos utilizan un fluido refrigerante que absorbe el calor del ambiente, incluso en condiciones de baja radiación solar o durante la noche. Este fluido circula a través de un compresor y un intercambiador de calor, donde transfiere su energía al agua. Estos sistemas son altamente eficientes y funcionan en cualquier condición climática, aunque su costo inicial es más elevado que otros tipos de calentadores solares (Andrade, 2015).

2.4 Efecto termosifón

Es un principio fundamental en los calentadores solares de agua que operan por circulación natural. Este fenómeno se basa en la diferencia de densidad del agua según su temperatura: el agua fría, al calentarse en el colector solar, disminuye su densidad y asciende hacia el tanque de almacenamiento, mientras que el agua más fría y densa desciende para ser calentada. Este ciclo continuo permite la circulación del agua sin necesidad de bombas, aprovechando únicamente las propiedades físicas del fluido y la gravedad. Para optimizar este proceso, es esencial que el tanque de almacenamiento se ubique por encima del colector, facilitando así el flujo natural del agua caliente hacia el tanque y garantizando una eficiencia óptima del sistema (Arturo López Martínez et al., 2012).

2.5 Principios de termodinámica y transferencia de calor en calentadores solares

Los calentadores solares operan basándose en los principios de la termodinámica y la transferencia de calor, usando la energía solar incidente, siendo esta captada por colectores solares, donde se convierte en energía térmica que se transfiere al agua mediante mecanismos de conducción y convección. Para un diseño eficiente estos sistemas requieren un análisis de las propiedades termodinámicas del agua, los materiales

involucrados y los coeficientes de transferencia de calor para maximizar la absorción de energía y minimizar las pérdidas térmicas (Galicia y Matus, 2020). Estudios como el de Garcia & Ortiz (2023) en el Instituto Politécnico Nacional mencionan la importancia del balance de energía en calentadores solares, resaltando la importancia de evaluar las pérdidas de calor y la eficiencia del colector para optimizar el rendimiento del sistema.

2.6 Tecnologías de captación, almacenamiento térmico y control automatizado

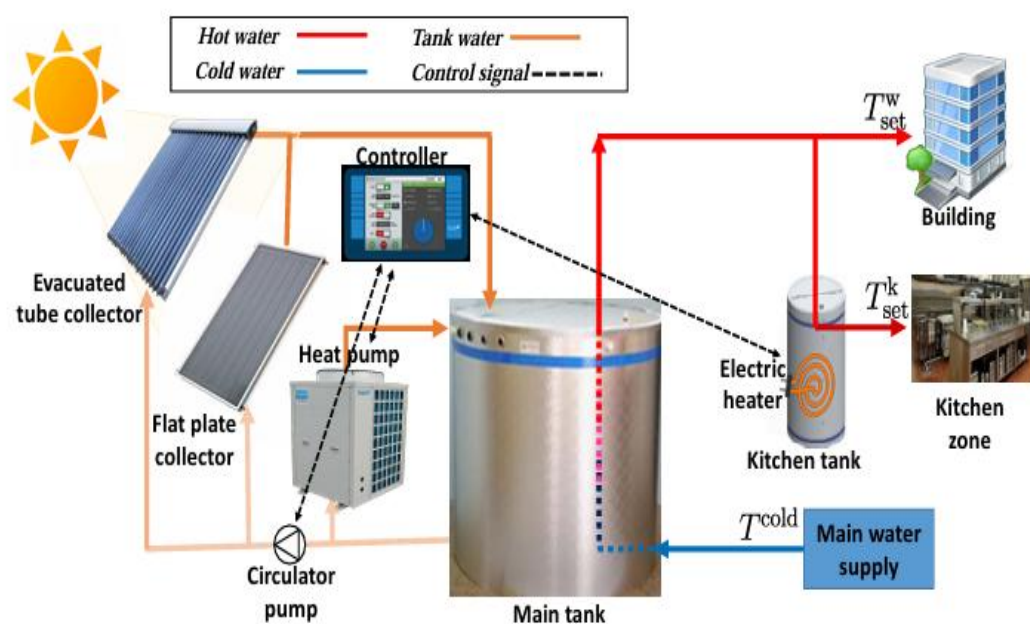
El uso de energía solar para calentar agua se ha consolidado como una opción eficiente y respetuosa con el medio ambiente, especialmente cuando se emplean sistemas automatizados que optimizan la captación y el almacenamiento de calor. Estas tecnologías funcionan mediante la captura de radiación solar con colectores solares, que transforman la energía solar en calor, la eficiencia de estos sistemas no solo depende de la calidad de los colectores, sino que también dependen de su capacidad de almacenamiento térmico por eso los sistemas de almacenamiento de calor, como los tanques de calor latente (PCM), han demostrado ser más efectivos, ya que permiten almacenar energía durante las horas de mayor radiación solar y liberarla cuando se requiere considerando así que el diseño de estos sistemas debe enfocarse en mejorar tanto la captación solar como la capacidad de almacenamiento para lograr una eficiencia óptima del sistema (Zakri et al., 2023).

Un punto para considerar en el diseño de este sistema es la incorporación de tecnologías de control que aseguren una gestión adecuada de la temperatura y el flujo de agua. Los sistemas automáticos, como los controladores lógicos programables (PLC) como se muestra en la figura 1, permiten de una manera sencilla la adaptación dinámica del funcionamiento del sistema dependiendo de las condiciones externas ya que estos sistemas no solo regulan la distribución de la energía solar, sino que también maximizan

el uso de los recursos energéticos al ajustar la operación según las variaciones en la radiación solar o la temperatura ambiental. Una estrategia eficaz en este sentido es emplear controladores que integren sensores de temperatura y radiación solar, permitiendo ajustar en tiempo real el flujo de agua caliente y así optimizar la eficiencia térmica del sistema (Li et al., 2018).

Figura 2

Demostración del sistema solar de calentamiento de agua con controladores



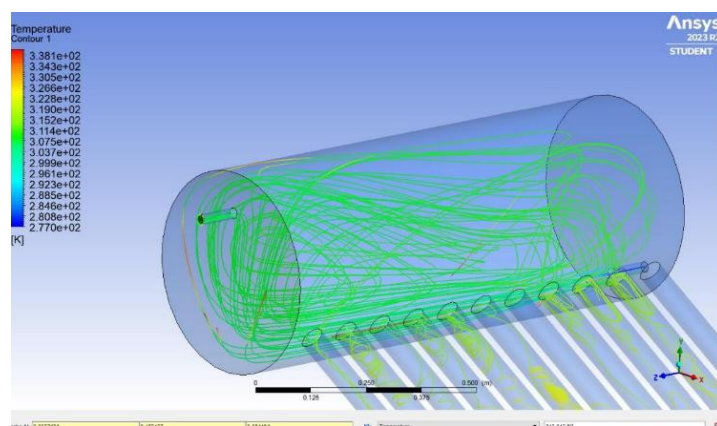
Nota. Sistema completo de calentamiento de agua controlado por PLC, obtenido de (Li et al., 2018).

Chambi (2024) muestra un diseño basado en modelos matemáticos que simulan la trayectoria del sol y los principios de la transferencia de calor incluyendo en el sistema ocho anillos reflectores que concentran la luz solar en un punto focal, donde se encuentra un receptor térmico que calienta 1.5 litros de agua hasta su punto de ebullición. Para el monitorear del proceso, se creó un medidor de temperatura que utiliza componentes electrónicos y un software específico para registrar los datos, resultando en una eficiencia

del 15.9%, con una pérdida por radiación del 82.6% y una pérdida por convección del 1.5%.

Poclin & Vilca (2023) desarrollaron un diseño de calentador solar para proporcionar agua caliente a los usuarios de la escuela Andrés Avelino Cáceres, utilizando energía solar y equipos de baja temperatura como colectores solares de tubos de vacío. El diseño del calentador fue validado con el software Autodesk Inventor para evaluar la resistencia de la estructura de soporte y con Ansys Fluent Meshing como se muestra en la figura 2, para análisis térmicos computacionales. Los resultados indicaron factores de seguridad de 1.53, 1.85 y 1.64 para ángulos de inclinación de 5°, 15° y 30° respectivamente, y se dimensionó el termo tanque con un diámetro interno de 470 mm y una longitud de 1160 mm, fabricado en acero inoxidable y aislado con espuma de poliuretano de 1½” de espesor. El colector solar incluyó 11 tubos de vacío termosifónicos de 58 mm de diámetro y 1800 mm de largo, con una orientación de 20° NE y ángulos de inclinación ajustables. La simulación mostró que el agua alcanza una temperatura de salida de 40.02 °C.

Figura 3
Análisis térmico



Nota. Análisis térmico mediante el Software Ansys Fluent Meshing, obtenido de Poclin & Vilca (2023).

Hobbi & Siddiqui (2009) analizaron los parámetros de diseño requeridos y calcularon sus valores óptimos con el programa de simulación TRNSYS, tomando la fracción solar como parámetro principal de optimización. Ajustaron los parámetros de diseño del sistema completo como del colector, incluyendo el área del colector, tipo de fluido, flujo másico del colector, volumen y altura del tanque de almacenamiento, eficiencia del intercambiador de calor, tamaño y longitud de las tuberías de conexión, así como el material y grosor de la placa absorbente, cantidad y tamaño de los tubos ascendentes, el espaciado entre tubos y la relación de aspecto del colector. Los resultados indican que el sistema, utilizando energía solar, cubre entre el 83 y 97 % de la demanda de agua caliente en verano y el 30 y 62 % en invierno. Además, se determinó que un colector de revestimiento no selectivo, fabricado localmente, puede cubrir el 54 % de las necesidades anuales de energía para calentamiento de agua con energía solar.

Camargo Nogueira et al. (2016) describen el desarrollo de un software diseñado para calcular el tamaño óptimo de sistemas pequeños de calentamiento solar de agua, creado en la plataforma MATLAB con un algoritmo que minimiza la intervención del usuario, usando el método F-Chart y las Normas Técnicas Brasileñas (NBR-15569), así como análisis económicos, el software busca optimizar técnica y económicamente cada proyecto. Su base de datos incluye datos de rendimiento de equipos comerciales, resultados del Programa Brasileño de Etiquetado y datos meteorológicos del Atlas Solarimétrico Brasileño y el Instituto Agronómico de Paraná, esta base de datos permite dimensionar sistemas de circulación natural y forzada con diferentes tipos de colectores y tanques de almacenamiento, y también facilita la modificación de parámetros para simular escenarios distintos.

Jamar et al. (2016) examinan en su artículo los desarrollos recientes en calentadores solares enfocándose en tres componentes que pueden influir en el rendimiento térmico del sistema así como el avance de distintos tipos de colectores solares usados en estos calentadores, tanto no concentradores como el colector de placa plana y el colector de tubo de vacío, al igual que concentradores como el reflector parabólico y el colector de canal parabólico. Cada tipo se evalúa en términos de optimización óptica, reducción de pérdidas de calor, mejora en la recuperación de calor y los mecanismos de seguimiento solar. Entre los distintos colectores, los de reflector parabólico muestran el mejor rendimiento global. Además, exploran el uso de nanofluidos como medio de transferencia de calor. Sharafeldin & Gróf (2018) señalaron que los nanofluidos son una estrategia innovadora para mejorar las propiedades térmicas de los fluidos en colectores solares, añadiendo nanopartículas de metales y óxidos metálicos de menos de 100 nm al fluido base.

Ajeena et al. (2024) mencionan que los dispositivos de transferencia de calor actuales suelen usar nanofluidos debido a su eficiencia superior frente a los fluidos tradicionales, además evaluó la estabilidad del nanofluido de óxido de aluminio (Al_2O_3) en agua desionizada y comparó la eficiencia térmica del colector solar de tubo de vacío (ETSC) al utilizar nanofluidos de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{DI}$ en diferentes concentraciones (entre 0,1% a 0,3%) frente al uso de solo agua desionizada.

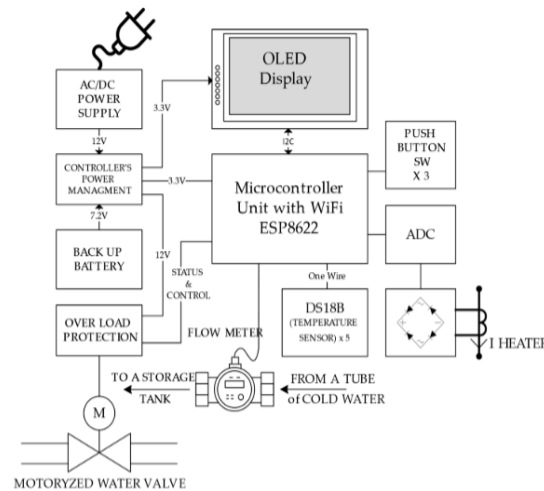
El resultado fue que el uso de Al_2O_3 en el colector aumenta hasta un 39,6% la diferencia de temperatura del fluido y un 33% la ganancia de calor a 950 W/m^2 de irradiancia solar, además, los nanofluidos mejoran el factor de eliminación de calor entre 1,17 y 1,23 veces respecto al agua en el mismo caudal, generando una eficiencia térmica un 26,3% mayor.

La selección de materiales es importante al diseñar un colector solar de placa plana, se deben tener en cuenta el costo, la disponibilidad, la facilidad de instalación y la vida útil. Materiales como el cobre, el aluminio, el acero y el acero inoxidable son comunes para la placa absorbente. Los elevadores y los cabezales suelen estar hechos de cobre, aluminio o acero inoxidable. Para el aislamiento como lana de roca, celulosa, poliestireno, espuma de poliuretano y espuma de poliisocianurato se utilizan comúnmente. Las opciones de acristalamiento son el vidrio templado, vidrio con bajo contenido de hierro y policarbonato. La orientación de un colector solar debe estar orientado al sur con un ángulo de inclinación entre $26^\circ \pm 5^\circ$ desde el plano horizontal, con mecanismos ajustables. La hora solar aparente se puede determinar considerando la diferencia horaria y la longitud (Almutairi, 2024).

2.7 Integración de sistemas automatizados y monitoreo en el diseño de calentadores solares de agua

Para desarrollar e implementar un módulo automatizado de calentamiento de agua, es necesario lograr una integración entre los distintos componentes del sistema solar, el control automático y los sistemas de monitoreo, para esto, un método comúnmente utilizado en estos sistemas es la incorporación de controladores programables (PLC) como se muestra en la figura 3, los cuales permiten una automatización precisa adaptada a las condiciones ambientales.

Figura 4
 Descripción del diseño de control



Nota. Diagrama detallado de sistema de calentamiento de agua automatizado por PLC, obtenido de (Krinitzky y Averbukh, 2024).

Por ejemplo, en una investigación sobre la implementación de un sistema automatizado para calefacción de agua en viviendas, se empleó un PLC para gestionar la distribución de energía solar y regular la temperatura del agua dentro de un sistema que combinaba paneles solares y calefactores eléctricos, optimizando así el rendimiento del sistema de acuerdo con las variaciones del clima (Krinitzky y Averbukh, 2024).

El monitoreo y la regulación de variables críticas, como la temperatura y el caudal de agua son factores principales para garantizar el rendimiento térmico del sistema, con un modelo automatizado al cual se debe incorporar sensores de alta precisión para medir la radiación solar, la temperatura ambiente y la temperatura del agua. Los estudios sobre el diseño e implementación de sistemas solares automatizados resaltan la importancia de integrar sensores y actuadores para ajustar el flujo de agua caliente, lo que permite que el sistema se ajuste automáticamente a los cambios en las condiciones de temperatura (Albanna *et al.*, 2020).

Según Ekpo & Enyinna (2017) , construyó un equipo de calentamiento solar que está compuesto por un colector solar y un tanque de almacenamiento conectados mediante tuberías de entrada y salida. El sistema cuenta con aislamiento en la parte inferior y los laterales para minimizar las pérdidas de energía térmica, mientras que la parte frontal está cubierta con vidrio que facilita la absorción de energía solar y reduce las pérdidas térmicas por convección. Se evaluó el sistema durante 3 horas en días con condiciones estándar de radiación solar, durante los cuales, se registraron variaciones en la temperatura ambiente en la entrada y salida, que oscilaron entre 37 y 44 °C, 41 y 42 °C, y 71 y 76 °C, respectivamente. Los resultados mostraron un incremento pico de temperatura en el rango de 30 °C a 36 °C.

Chi et al. (2018) presenta los resultados del diseño y construcción de un colector solar con forma cónica, diseñado para un calentador solar, este sistema fue construido específicamente para las condiciones del sureste de México, utilizando un ángulo que corresponde a la latitud de la ciudad de Mérida, considerando un ángulo de incidencia solar cercano a 90°. Además, el colector fue fabricado con un recubrimiento de partículas de carbón, lo cual, en conjunto con el ángulo de incidencia, a mejoraron la eficiencia del colector en comparación con modelos comerciales logrando una eficiencia del 85%, alcanzando temperaturas superiores a 65 °C en la salida del colector.

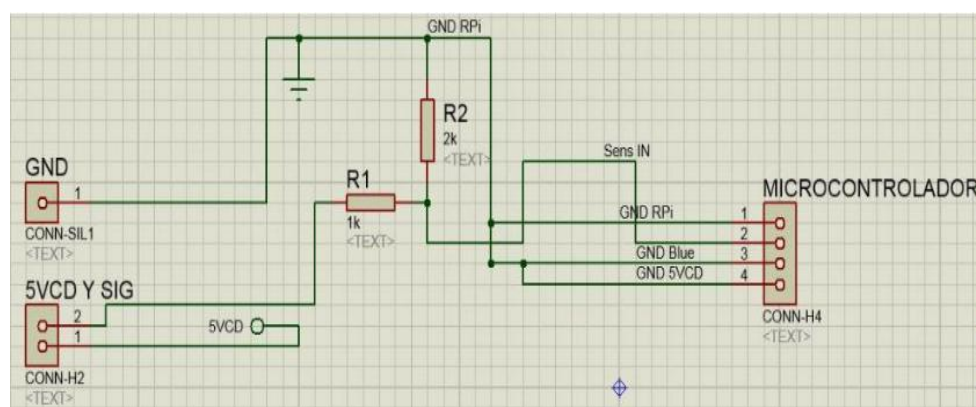
Peña (2019) menciona que, para realizar esta evaluación, se diseñó un calentador solar utilizando materiales alternativos, tales como botellas de PET de 1,500 mL, tubos de PVC y un tanque de almacenamiento con una capacidad de 25 litros. Los datos fueron recolectados durante el mes de mayo de ese mismo año, y se comprobó que el calentador podía alcanzar una temperatura del agua en un rango de 40 a 60 °C. La eficiencia del sistema se calculó considerando la energía generada por el vapor de agua y la energía solar capturada, además se tomó en cuenta la variación de la radiación solar a lo largo del

tiempo en un área de curvatura suave dando como resultado una eficiencia diaria del 33%. A partir de estos datos, se determinó que solo se necesitaba un colector para la instalación y además, se evaluaron el impacto ambiental promedio y el costo total del sistema, con un valor final de 529.00 CUP.

2.8 Evaluación y simulación de la eficiencia térmica en sistemas solares de calentamiento de agua

La evaluación del desempeño y la eficiencia térmica en sistemas de calentamiento solar de agua resulta clave para impulsar tecnologías sostenibles en el ámbito de las energías renovables. Un ejemplo de ello se encuentra en una investigación desarrollada en el Instituto Politécnico Nacional, que aborda el diseño y selección de dispositivos de monitoreo para analizar la eficiencia térmica en calentadores solares. Este estudio subraya la importancia de registrar variables fundamentales como flujo, temperatura y radiación solar como queda evidenciado en la figura 4, para optimizar el rendimiento del sistema, asegurando su cumplimiento con las normativas mexicanas aplicables (Llera, 2018).

Figura 5
Monitoreo y evaluación de la eficiencia del sistema



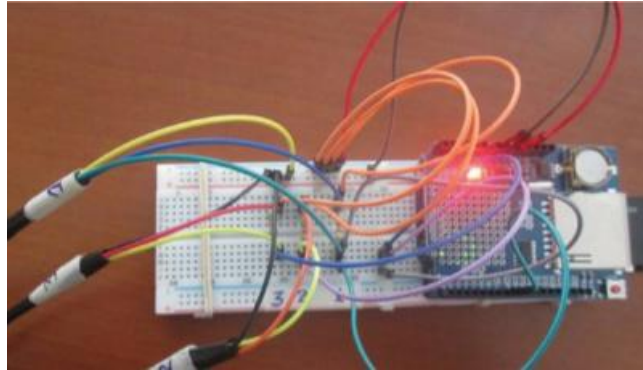
Nota. Diagrama detallado para monitorear y evaluar la eficiencia del sistema, obtenido de (Llera, 2018).

Navas (2011) propone un modelo de simulación para sistemas solares térmicos, utilizando redes neuronales artificiales para analizar variables como la irradiancia solar, temperatura ambiental, caudal de agua caliente y temperatura de entrada al depósito, este enfoque permite simular dinámicas a corto y largo plazo, optimizando el rendimiento del sistema. Comparado con el método f-chart, este modelo mejora la precisión al considerar la estratificación térmica en el depósito y corregir parámetros no especificados como el caudal del fluido portador. También, permite desarrollar metodologías para predecir variables ambientales, logrando estimaciones más confiables de radiación solar y eficiencia térmica, ayudando al diseño y operación de estos sistemas.

Espinoza y Barrena (2019) describen un sistema compuesto por tuberías de PVC de 3/4" para agua caliente y un tanque de almacenamiento de 100 litros, implementado en Chachapoyas, Amazonas, a 2,350 msnm y con una temperatura promedio de 17 °C y una humedad relativa entre el 60 % y 70 %. Para registrar las temperaturas, se usaron sensores DS18B20 digitales conectados a un módulo Arduino UNO tal como indica la figura 5, tomando datos cada 15 minutos durante 31 días, de 8:00 a 16:00 horas. Simultáneamente, se registraron radiación solar, temperatura ambiente, precipitación pluvial y velocidad del viento con una estación meteorológica del INDES-CES. Los días se clasificaron en tres categorías según la radiación solar: nublados (0-300 W/m²), combinados (600-800 W/m²) y soleados (>800 W/m²). La radiación solar captada fue de 1.90 kW/m², 0.89 kW/m² y 2.04 kW/m² para cada categoría respectivamente. La eficiencia del colector fue del 35.64 % en días nublados, de 38.51 % en días combinados y 44.57 % en días soleados. El almacenamiento de agua contuvo 87.10 litros en días nublados, 89.52 litros en días combinados y 90.51 litros en días soleados demostrando una eficiencia del sistema de entre el 30 % y el 50 %, dependiendo de las condiciones de radiación solar.

Figura 6

Sensores para monitoreo



Nota. Montaje de Arduino UNO, Datalogger para monitoreo de Sistema de calentamiento de agua, obtenido de Espinoza y Barrena (2019).

2.9 Normativa internacional aplicable a sistemas solares térmicos

En el diseño y evaluación de sistemas solares térmicos para calentamiento de agua, es indispensable considerar el marco normativo internacional que regula los métodos de prueba, los requisitos de seguridad y los criterios de desempeño. Estas normas permiten que los colectores y sistemas completos sean comparables entre sí manteniendo una misma calidad del proceso constructivo y garantizando que los ensayos realizados proporcionen resultados válidos y reproducibles. Además, la normativa resulta una guía técnica para el desarrollo de prototipos académicos y de investigación ya que establece parámetros mínimos de eficiencia, durabilidad y confiabilidad.

2.9.1 Normas internacionales (ISO) aplicables a colectores.

La evaluación del colector y del sistema experimental de este trabajo se fundamenta en los métodos normalizados internacionalmente para ensayos de colectores solares. En particular, la guía técnica y la literatura de apoyo a la ISO 9806 (Solar thermal collectors — Test methods) ofrecen procedimientos para medir eficiencia térmica,

pérdidas, estabilidad y durabilidad, así como criterios para ensayos de laboratorio e in situ, lo cual es esencial para validar experimentalmente un prototipo didáctico y automatizado como el aquí desarrollado. Para facilitar el acceso y la interpretación práctica de esa norma en entornos académicos y de ensayo se recomienda apoyarse en la guía del IEA Solar Heating and Cooling (Task 57) y en estudios de laboratorio que aplican protocolos cuasi-dinámicos basados en ISO 9806; esas fuentes explican cómo adaptar los métodos de ensayo a colectores de placa plana y configuraciones didácticas típicas de laboratorios universitarios (Fraunhofer, 2018).

2.9.2 Normativa ecuatoriana y requisitos de construcción / instalaciones (NEC, NTE-INEN)

En el ámbito nacional, el diseño y la instalación del módulo automatizado se ajustan a los requisitos del Marco Normativo Ecuatoriano para sistemas solares térmicos y la construcción. El Reglamento Técnico y las normas NTE/INEN relacionadas establecen requisitos mínimos de seguridad, desempeño térmico, etiquetado y métodos de ensayo para colectores y sistemas prefabricados, y se integran con la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) para instalaciones y seguridad en obra. Documentos oficiales del registro técnico ecuatoriano y el compendio NEC-HS (Capítulo Energías Renovables) recogen la adopción práctica de normas como NTE INEN 2507 (requisitos y métodos de ensayo de colectores líquidos <100 °C) y referencias a EN/UNE para acumuladores y sistemas; estas disposiciones sirven de base para las decisiones de diseño (materiales, espesores, aislamiento) y para los protocolos de ensayo e instrumentación que aplicó este proyecto en el Laboratorio de Energías Renovables de la UTN (MINISTERIO DE INDUSTRIAS Y PRODUCTIVIDAD, 2018).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

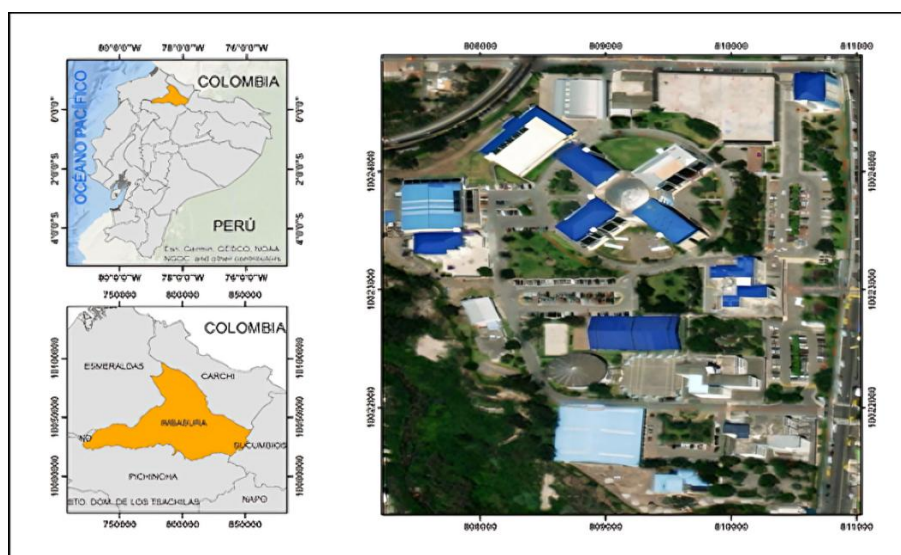
En este capítulo se presenta la descripción del área de estudio, diseño y procedimientos técnicos aplicados en la creación del módulo automatizado para el calentamiento de agua utilizando energía solar.

3.1 Área de estudio

El área de estudio está en la provincia de Imbabura, en la ciudad de Ibarra, campus El Olivo de la Universidad Técnica del Norte, en la Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales (FICAYA) que alberga el Laboratorio de Energías Renovables; a una altitud de 2207 m.s.n.m., con una radiación solar aproximada entre 4.5 y 5.5 kWh/m² a lo largo del año (Figura 6).

Figura 7

Mapa de ubicación



Nota. Esta imagen muestra una vista aérea de la Universidad Técnica del Norte diseñada en el software ArcGIS versión 10.8

3.2 Métodos

3.2.1 Diseño de subsistemas mecánicos del módulo automatizado de calentamiento de agua mediante energía solar

El diseño y la construcción del calentador solar han sido desarrollados principalmente conforme a las especificaciones de la norma ecuatoriana NEC 10. En este proceso, se considerarán factores esenciales, tales como la localización geográfica, las características climáticas del entorno y las demandas asociadas al uso del agua.

3.2.1.1 Selección de alternativa de diseño y de sus elementos constitutivos.

Para seleccionar la mejor alternativa de diseño entre calentadores solares de tubo de vacío, calentadores solares de placa plana y calentadores solares de concentración, se utilizó el método ordinal corregido de criterios ponderados. Los criterios de evaluación fueron: eficiencia térmica (ET), costo (C), durabilidad (D), mantenimiento (M), facilidad de instalación (FI), impacto ambiental (IA), estética (E) y tamaño (T). La Tabla 1 muestra el análisis comparativo del peso específico de cada criterio.

Tabla 1

Evaluación del peso específico de cada criterio de la selección alternativa

Criterio	ET	C	D	M	FI	IA	E	T	$\sum+1$	Ponderación
ET	—	1	1	1	1	1	1	1	8	0.2623
C	0	—	0.5	0.5	1	1	0.5	1	4.5	0.1475
D	0	0.5	—	1	1	1	1	1	6.5	0.2131
M	0	0.5	0	—	1	1	1	1	5.5	0.1803
FI	0	0	0	0	—	1	1	1	4	0.1311
IA	0	0	0	0	0	—	1	1	3	0.0984
E	0	0.5	0	0	0	0	—	1	2.5	0.0819
T	0	0	0	0	0	0	0	—	1	0.0328
Suma Total									30.5	1

Nota. Esta tabla muestra la ponderación de cada criterio de evaluación.

En cuanto al dimensionamiento del equipo, se establece que el volumen de agua a calentar es de 100 litros, una cantidad que se considera adecuada para este equipo de laboratorio. El calentador solar este compuesto 2 subsistemas principales:

- Diseño del termotanque.
- Diseño de la placa colectora.

Se detallan a continuación los cálculos y características de cada uno de estos subsistemas que garantizan un funcionamiento eficiente, confiable y con criterios técnicos de simetría.

3.2.1.2 Diseño termotanque.

El termotanque fue el recipiente encargado de almacenar el agua calentada. Se diseñó con dos tanques concéntricos: uno interior y uno exterior, con lana de vidrio como material aislante entre ambos. Los dos tanques fueron fabricados en acero inoxidable AISI 304 por su alta resistencia a la corrosión y durabilidad. El volumen del termotanque fue de 100 litros de agua donde:

Densidad del agua:

$$\rho_{H_2O} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

Volumen del agua:

$$V = 100 \text{ litros} = 0.1 \text{ m}^3$$

Masa del agua se calculó mediante la ecuación 1 (Yacolta, 2024):

$$M = \rho_{H_2O} * V \tag{1}$$

Donde:

M = Masa del agua [kg]

ρ_{H_2O} = Densidad del agua [kg/m³]

V = Volumen del agua [m³]

El volumen del termotanque debió ser mayor a 100 litros para evitar que el agua quede al límite y deje espacio para posibles expansiones térmicas. Para esto, se aplicó un factor de seguridad de 1.5:

$$V_{seguro} = 100\text{litros} \cdot 1.5 = 150\text{litros} = 0.15\text{m}^3$$

El termotanque tuvo forma cilíndrica, y la relación entre el volumen y las dimensiones del cilindro fueron de acuerdo con la ecuación 2 (Salas Flores et al., 2024):

$$V = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot L \quad (2)$$

Donde:

D = Diámetro interno en el tanque [m]

L = Longitud del tanque [m]

Para asegurar que el termotanque soporte la masa de agua de 100 kg, se utilizó la ecuación 3 de presión hidrostática (López Ruiz & Prabhú, 2021):

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (3)$$

Donde:

- P = presión [Pa]

- ρ = densidad del agua [kg/m³]
- g = gravedad 9.81 [m/s²]
- h = altura del agua [m]

Teniendo en cuenta que este equipo se va a instalar en un laboratorio, se consideró que la altura máxima sea de 110 cm.

El espesor mínimo del acero inoxidable se calculó con la ecuación 4 de resistencia de cilindros sometidos a presión interna (Palmieri Panesso et al., 2018):

$$e = \frac{P \cdot D}{2 \cdot \sigma} \quad (4)$$

Donde:

e = espesor del material [m]

P = presión interna [Pa]

D = diámetro del termotanque en [m]

σ = límite de fluencia del acero inoxidable (aproximadamente 215 MPa)

El aislamiento térmico se realizó con lana de vidrio, que tuvo una baja conductividad térmica:

Conductividad térmica de la lana de vidrio: $\lambda = 0.04 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

Espesor del aislamiento: 5 cm (0.05 m)

La resistencia térmica del aislamiento se calculó con la ecuación 5 (Andonaegui Hernández, 2016):

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (5)$$

Donde:

R = Resistencia térmica [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]

e = Espesor del material [m]

λ = Conductividad térmica del material [W/mK]

3.2.1.3 Diseño del Serpentín.

Se diseñó un serpentín que fue colocado en un tanque cilíndrico con un volumen de 150 litros (0.1m^3). El objetivo fue calentar agua que fluyó a través del serpentín desde una temperatura de entrada de $15\text{ }^\circ\text{C}$ hasta una temperatura de salida de $40\text{ }^\circ\text{C}$. El serpentín estuvo hecho de cobre con un diámetro externo de $d_{\text{ext}} = 15.88\text{ m}$ ($1/2$ pulgada).

Flujo másico del agua en el serpentín: $\dot{m} = 0.1\text{ kg/s}$

Calor específico del agua: $C_p = 4186\text{ (J/kg }^\circ\text{K)}$

Temperaturas:

Entrada al serpentín: $T_{i,\text{serp}} = 15\text{ }^\circ\text{C}$

Salida del serpentín: $T_{f,\text{serp}} = 40\text{ }^\circ\text{C}$

Para el cálculo del calor necesario para calentar el agua en el serpentín con la ecuación 6 (Lamas Galdo, 2022) fue:

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{f,\text{serp}} - T_{i,\text{serp}}) \quad (6)$$

Para el coeficiente global de transferencia de calor (U) se usó la ecuación 7 (Qian et al., 2021):

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{tanque}} + \frac{t}{k_{cobre}} + \frac{1}{h_{serp}} \quad (7)$$

Parámetros:

Coeficiente de convección del agua en el tanque: $h_{tanque} = 800 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Coeficiente de convección del agua dentro del serpentín: $h_{serp} = 3000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Conductividad térmica del cobre: $k_{cobre} = 385 \text{ W}/(\text{m}\text{K})$

Espesor del serpentín: $t = \frac{d_{ext} - d_{int}}{2}$

Diámetro interno del serpentín: $d_{int} = 0.0226 \text{ m}$

Para la Temperatura Mínima del Agua en el Tanque ($T_{\min, \text{tanque}}$), primero, se calculó el valor de ΔT_{lm} necesario para transferir el calor con la ecuación 8 (Sánchez Escalona & Leyva, 2021):

$$\Delta T_{lm} = \frac{Q}{U \cdot A} \quad (8)$$

Posteriormente se sustituye este valor de ΔT_{lm} en la ecuación de la diferencia logarítmica de temperatura:

Para el cálculo de la diferencia logarítmica de temperatura (ΔT_{lm}). La diferencia logarítmica de temperatura fue con la ecuación 9 (Sánchez Escalona & Leyva, 2021):

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{tanque} - T_{f,serp}) - (T_{tanque} - T_{i,serp})}{\ln\left(\frac{T_{tanque} - T_{f,serp}}{T_{tanque} - T_{i,serp}}\right)} \quad (9)$$

Al igual que Sánchez Escalona & Leyva (2021) se usó la ecuación 10 para calcular el área requerida.

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_{lm}} \quad (10)$$

El área del serpentín se relacionó con la longitud mediante la ecuación 11 (Boix Puig, 2018):

$$A = \pi \cdot d_{ext} \cdot L \quad (11)$$

Asumiendo un $D = 0.30$ m el número de vueltas se calculó con la ecuación 12 (Boix Puig, 2018):

$$N = \frac{L}{\pi \cdot D} \quad (12)$$

Para evitar interferencias térmicas, el espaciado entre vueltas fue de 6 a 8 veces el diámetro externo de la tubería.

La energía requerida para calentar el agua se calculó con la ecuación 13 (Ramos, 2020):

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (13)$$

Donde:

m = masa de agua [kg]

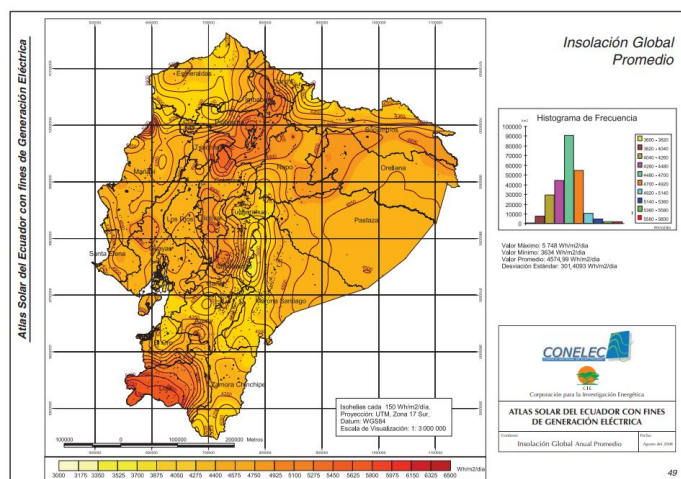
C_p = calor específico del agua [4.18 kJ/kg°C]

$$\Delta T = \text{diferencia de temperatura } T_2 - T_1 [65^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C} = 50^\circ\text{C}]$$

3.2.1.4 Diseño de la placa colectora plana.

Para determinar la radiación global, se utilizó la información proporcionada por el Atlas Solar del Ecuador, a partir de la cual se obtuvo el promedio anual de radiación global. Este valor se calculó considerando los datos mensuales de radiación global como se observa en la figura 8, lo que permitió una estimación más precisa de la energía solar disponible como se muestra en la tabla 3.

Figura 8
Insolación global promedio de Ecuador



Nota. Mapa obtenido del Atlas Solar del Ecuador (CONELEC, 2008).

Tabla 2
Insolación global

Meses	Insolación Global [Wh/m ² · día]
Enero	4411,18
Febrero	4480,31
Marzo	4655,19

Abril	4360,2057
Mayo	4276,06
Junio	4140,13
Julio	4308,48
Agosto	4624,62
Septiembre	4974,44
Octubre	4888,34
Noviembre	4943,48
Diciembre	4837,51
PROMEDIO	4574,995475

Nota. Esta tabla muestra el promedio de insolación global en Ecuador.

La ecuación 14 para calcular el área de la placa colectora fue:

$$A_{capt} = \frac{E}{\eta \cdot G} \quad (14)$$

Donde:

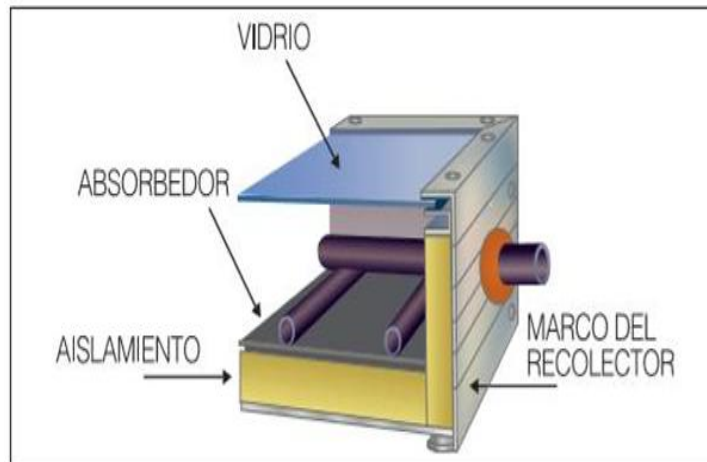
E = energía necesaria [5805.5556 Wh]

η = Eficiencia del colector (rango típico: 0.6 a 0.8).

G = insolación global [4574.99548 Wh/m²·día]

La placa colectora se construyó en configuración sánduche como se muestra en la figura 9.

Figura 9
Colector placa plana tipo sánduche



Nota. Disposición de elementos de placa colector plana tipo sánduche, obtenido de (Ludeña & Carrión Andrés, 2010).

Vidrio: Una cubierta transparente que permite la entrada de radiación solar al interior del colector y redujo las pérdidas de calor hacia el exterior.

Absorbedor: Superficie metálica de aluminio que convierte la radiación solar en energía térmica. Estuvo en contacto con tubos donde circula el fluido de trabajo.

Aislamiento: Material que rodea el colector por los laterales y la parte inferior, minimizando las pérdidas de calor hacia el ambiente.

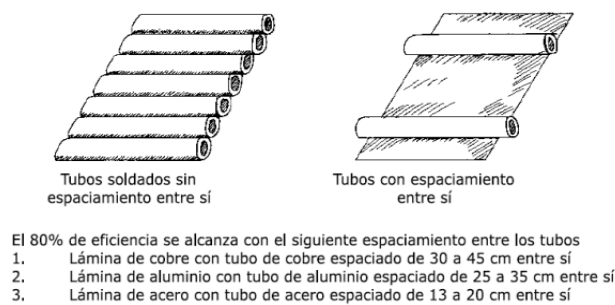
Marco del recolector: Estructura rígida que da soporte y protección al colector solar, integrando todos los componentes.

Tuberías o conductos internos: Por donde fluye el líquido de transferencia de calor (como agua o una mezcla de agua y anticongelante), que transporta la energía térmica captada. Se puede utilizar dos tipos de tuberías, las tuberías en paralelo fueron las más adecuadas, permitieron un mayor flujo de trabajo sobre el área del colector, mientras que las de forma de serpentín no cumplieron con los requisitos establecidos.

La distancia entre los tubos fue relevante como la elección del material absorbente y el método de fijación utilizado. Este espaciamiento depende del tipo de metal y del diámetro del tubo. En la Figura 8 se detalla el tamaño de los tubos y la separación óptima entre ellos que logró un absorbente eficiente utilizando los metales indicados.

Figura 10

Eficiencia según espaciamiento

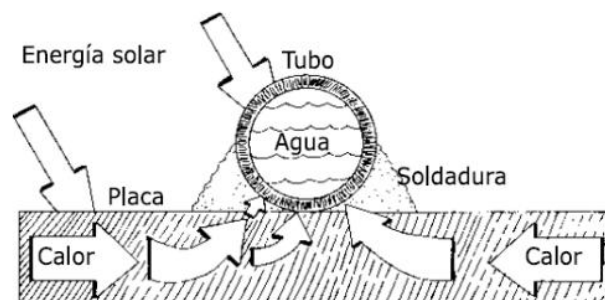


Nota. Espaciamiento de tubos según el tipo de material, obtenido de (Ludeña & Carrión Andrés, 2010).

Para el diseño fue con tubería de cobre de media pulgada distribuida en paralelo y de 3/4 para los cabezales. Los tubos se soldaron a la placa plana (figura 9).

Figura 11

Tubería soldada a la placa plana



Nota. Esquema de cómo absorbe el agua el calor mediante la tubería soldada a la plancha, obtenido de (Ludeña & Carrión Andrés, 2010).

A continuación, se determinó el número de tubos en paralelo con la ecuación 15:

$$N = \frac{\text{Ancho de la placa}}{\text{Separación entre tubos}} \quad (15)$$

Para determinar el ángulo de inclinación óptimo de los calentadores solares de agua en Ecuador, se pudo seguir una regla general que estableció que el ángulo debió ser igual a la latitud del lugar más un rango de 10 a 15 grados. Ibarra se encuentra aproximadamente a 0° de latitud, así que el ángulo recomendado para los colectores solares ronda entre 15° y 30°, este rango permitió maximizar la captación de energía solar durante todo el año, adaptándose a las condiciones climáticas locales y teniendo la mayor eficiencia del sistema.

La placa colectora del calentador solar se instaló con un ángulo que ronda entre los 15° respecto al plano horizontal. Este ángulo no solo facilitó una mejor exposición a la radiación solar, sino que también ayudó en la circulación del agua caliente, mejorando el rendimiento eficiente del sistema de calentamiento solar. Esta placa estuvo cubierta por vidrio templado de 4 mm, que tuvo una transmitancia solar del 90%.

La pérdida de calor a través de la cubierta se calculó con la ecuación 16 (Ramos, 2020):

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (16)$$

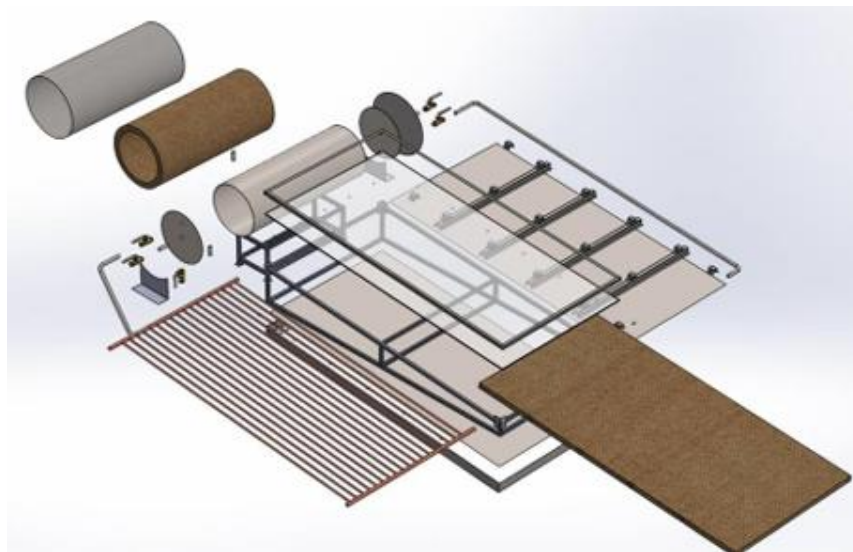
La distancia óptima entre la cubierta de vidrio y los tubos colectores estuvo entre 20 y 30 mm porque permitió la formación de una capa de aire que actuó como aislante térmico, reduciendo las pérdidas de calor por convección y generó una transmisión adecuada de la radiación solar hacia los tubos.

Se utilizó el programa SolidWorks para el diseño del calentador solar como se muestra en la figura 10, en donde se puede observar el termotanque, la placa protectora y

los tubos de cobre. Este software permitió realizar análisis de transferencia térmica y resistencia estructural, también permitió optimizar el diseño para garantizar la eficiencia y durabilidad del sistema. Otro programa se empleó fue AutoCAD para la elaboración de los planos hidráulicos del calentador solar como se evidencia en la figura 11, dando una representación clara de las conexiones y el flujo del agua dentro del sistema.

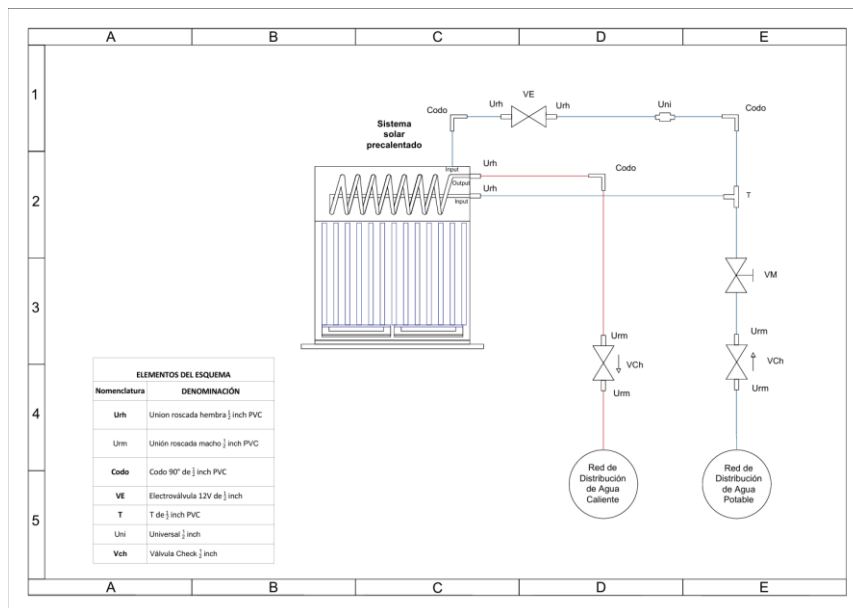
Figura 12

Modelo de calentador solar de placa plana



Nota. Diseño estructural de calentador solar plano en SolidWorks

Figura 13
Planos hidráulicos del sistema



Nota. Diseño detallado del sistema hidráulico hecho en AutoCAD

3.2.2 Diseño de subsistema electrónico del módulo automatizado de calentamiento de agua mediante energía solar

3.2.2.1 Sensores de temperatura.

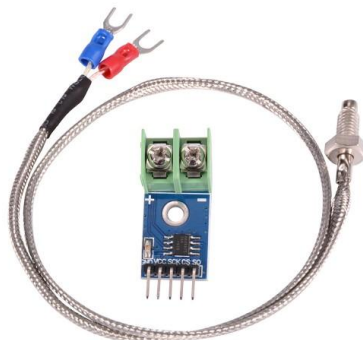
Para el monitoreo preciso de las temperaturas en el sistema, se implementaron 4 termocuplas tipo K acopladas a un módulo MAX6675 como se muestra en la figura 4, las cuales fueron ubicadas estratégicamente en los siguientes puntos críticos del sistema:

- Termotanque: Para medir la temperatura del agua almacenada.
- Placa colectora: Para registrar la temperatura de absorción solar.
- Entrada de agua fría: Para monitorear la temperatura inicial del fluido.
- Salida de agua caliente: Para controlar la temperatura final suministrada.

Estos sensores permitieron un registro continuo y confiable de las variaciones térmicas, facilitando el control automatizado del sistema.

Figura 14

Termocupla tipo K Con Modulo Max6675



Nota. Figura obtenida de (NOVATRONICEC, 2025).

Tabla 3

Características técnicas de las termocuplas tipo K y módulo MAX6675

Parámetro	Termocupla Tipo K	Módulo MAX6675
Rango de temperatura	-200°C a +1260°C	0°C a +1024°C
Precisión	±1.5°C o ±0.4%	±2°C (entre 0°C y 700°C)
Resolución	-	12 bits (0.25°C por LSB)
Tipo de salida	Señal analógica (mV)	Digital (SPI)
Tiempo de respuesta	<500 ms	<100 ms por conversión
Alimentación	No requiere	3.3V a 5V DC
Material de los electrodos	Cromel (positivo) / Alumel (negativo)	-
Aplicación en el sistema	Mediciones en puntos críticos	Conversión y transmisión de datos a Arduino

Nota. Especificaciones técnicas de los sensores implementados.

3.2.2.2 Sensor de nivel.

Para el control automático del nivel de agua en el termotanque, se implementó un sensor de nivel horizontal tipo F como se puede ver en la figura 5. Este dispositivo fue instalado en el interior del termotanque y permite monitorear cuatro estados de llenado: 25%, 50%, 75% y 100%.

Funcionamiento y configuración

- Cuando el nivel de agua desciende por debajo del 75%, el sensor activa una electroválvula para permitir el ingreso de agua fría.
- Al alcanzar el 100% de llenado, el sensor envía una señal para cerrar la electroválvula, evitando sobrellenados.
- Este sistema garantiza un suministro continuo de agua mientras optimiza el consumo y evita pérdidas.

Figura 15

Sensor nivel de agua horizontal tipo F



Nota. Figura obtenida de (NOVATRONICEC, 2025)

Tabla 4
Especificaciones del sensor de nivel tipo F

Parámetro	Descripción
Tipo de sensor	Flotador magnético horizontal
Material del cuerpo	Acero inoxidable AISI 304
Rango de detección	25%, 50%, 75%, 100%
Temperatura máxima	120°C
Presión máxima	10 bar
Salida eléctrica	Interruptor Reed (NC/NO)
Voltaje de operación	12V DC / 24V AC
Conexión	Roscada (1/2" NPT)
Protección IP	IP65 (resistente a salpicaduras)

Nota. Parámetros operativos del sensor de nivel horizontal tipo F.

3.2.2.3 Electroválvula para flujo de agua.

Se utilizó una válvula solenoide de 12V en el sistema de calentador solar de agua para automatizar el control del flujo de agua como se muestra en la figura 16. La válvula, de tipo normalmente cerrada y con una conexión roscada estándar de 1/2" G, permitió el paso del agua únicamente cuando recibió una señal eléctrica, optimizando así el suministro y evitando pérdidas de agua caliente.

Figura 16
Válvula solenoide de 12V



Nota. Figura obtenida de (Grupo Electrostore, 2025).

3.2.2.4 Pantallas LCD para Monitoreo del Sistema

Para la visualización en tiempo real de los parámetros operativos del sistema, se implementaron tres pantallas LCD 16x2, como se puede observar en la Figura 6. Estas pantallas muestran:

LCD 1:

- Muestra el porcentaje de llenado del termotanque (25%, 50%, 75%, 100%)

LCD 2:

- Temperatura del termotanque
- Temperatura de la placa colectora

LCD 3:

- Temperatura de entrada de agua fría

- Temperatura de salida de agua caliente

Figura 17
Pantalla LCD 16x2



Nota. Figura obtenida de (Grupo Electrostore, 2025).

Tabla 5
Especificaciones de las pantallas LCD 16x2

Parámetro	Especificación
Tipo de display	LCD alfanumérico
Configuración	16 columnas x 2 filas
Tecnología	Matriz de caracteres HD44780
Voltaje de operación	5V DC
Consumo de corriente	1.2 mA (sin retroiluminación)
Interfaz	Paralela/I2C (mediante adaptador)
Temperatura operativa	0°C a +50°C
Dimensiones	80mm x 36mm x 12mm
Color de caracteres	Blanco/Verde/Azul (ajustable)
Retroiluminación	LED azul (5V)
Resolución	5x8 píxeles por carácter
Protocolo comunicación	I2C (para este proyecto)

Nota. Parámetros operativos de la pantalla LCD.

3.2.2.5 Sistema de Monitoreo y Control

El sistema de monitoreo y control implementado se basa en una arquitectura hardware-software que integra LabVIEW como plataforma de visualización y procesamiento, junto con Arduino UNO como unidad de adquisición y control. Este sistema permite medir en tiempo real variables críticas del módulo automatizado gracias a los sensores implementados. Para el registro de temperaturas se emplearon cuatro termocuplas tipo K conectadas a módulos MAX6675, distribuidas estratégicamente en: la placa colectora, el termotanque, la entrada de agua fría y la salida de agua caliente. Adicionalmente, un sensor de nivel tipo F con salida digital envía información sobre el estado de llenado del termotanque en cuatro niveles (25%, 50%, 75% y 100%).

Los datos enviados por estos sensores son procesados por el microcontrolador Arduino UNO y transmitidos a la interfaz desarrollada en LabVIEW a través de comunicación serial. Esta configuración permite ver los parámetros operativos en tres pantallas LCD 16x2 (ubicadas físicamente en el módulo) y además puede generar un almacenamiento sistemático de los datos para un análisis posterior, la información recopilada incluye series temporales de temperaturas, niveles de agua y estados del sistema, lo que permite realizar análisis detallados del comportamiento térmico en función del tiempo.

3.2.3 Metodología de la construcción

La metodología de construcción del módulo automatizado de calentamiento de agua mediante energía solar se estructuró en función de los subsistemas mecánico, hidráulico y electrónico definidos durante la etapa de diseño. El proceso se desarrolló de manera secuencial, garantizando la coherencia entre los componentes estructurales y de control, así como la reproducibilidad del procedimiento. Con el fin de representar de

forma clara y ordenada cada una de las etapas involucradas, se elaboró un flujograma del proceso constructivo, el cual sintetiza la secuencia lógica de actividades ejecutadas desde la fabricación del termotanque hasta la integración del sistema electrónico y las pruebas finales. Todas las actividades se llevaron a cabo en el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Técnica del Norte, bajo condiciones controladas de seguridad y utilizando herramientas de fabricación y medición de precisión.

Construcción de un módulo automatizado de calentamiento de agua mediante energía solar

Definición de subsistemas (mecánicos, hidráulicos y electrónicos)

Fase 1: Fabricación del termotanque

Corte de láminas de acero inoxidable AISI 304

Enrolado de lámina para el termotanque

Soldadura TIG con varilla ER308L y gas argón

Aislamiento térmico con lana de vidrio

Sellado de juntas con silicona de alta temperatura

Instalación de accesorios hidráulicos y serpentín de cobre

Fase 2: Construcción de la placa colectora solar

Construcción del bastidor de aluminio anodizado

Colocación del aislante de lana de vidrio

Montaje de placa absorbente con recubrimiento negro mate

Soldadura de tubos de cobre en configuración paralela

Instalación de cubierta de vidrio templado

Fijación de estructura con ángulo óptimo de captación solar

Fase 3: Ensamblaje del sistema hidráulico

Conexión de tuberías PVC entre componentes

Instalación de válvulas de control y retención

Sellado de uniones con adhesivo y teflón

Pruebas de estanqueidad del circuito hidráulico

Fase 4: Integración del sistema electrónico y de control

Instalación de sensores de temperatura tipo K

Montaje de sensor de nivel tipo F en el tanque

Conexión al microcontrolador Arduino UNO

Instalación de electroválvula de 12 V para llenado automático

Integración de LabVIEW para monitoreo en tiempo real

Montaje de pantalla LCD para visualización y caja de control con protección IP

3.2.4 Evaluación de la Eficiencia del Módulo Automatizado

La evaluación del desempeño del módulo automatizado se realizará mediante un protocolo experimental que considera diferentes condiciones de operación. El análisis principal consistirá en correlacionar la radiación solar incidente, con la base de datos PVsyst, con la eficiencia térmica instantánea del sistema. Esta eficiencia se calculará utilizando la ecuación fundamental para calentadores solares:

$$\eta = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{salida} - T_{entrada})}{A * G} * 100$$

Donde

\dot{m} = flujo másico de agua

C_p = calor específico del agua

A = área del colector

G = radiación solar

Este cálculo se realizará para diferentes rangos horarios, permitiendo evaluar cómo varía la eficiencia a lo largo del día y bajo distintas intensidades de radiación.

De manera complementaria, se llevará a cabo un análisis estadístico que empleará modelos de regresión lineal y estudios de correlación, con el fin de medir la relación existente entre radiación solar que incide y la eficiencia térmica del sistema de calentamiento automatizado. Los datos experimentales que se obtengan serán comparados con los valores teórico-definidos por la norma ISO 9806 para sistemas de energía solar térmica, lo que facilitará la validación tanto del diseño mecánico del colector como del rendimiento de los algoritmos de control utilizados.

Todo el proceso de análisis se ejecutará de acuerdo con protocolos experimentales estandarizados, asegurando así que las pruebas sean reproducibles y que los resultados sean confiables. Esta metodología permitirá entender el comportamiento térmico del módulo automatizado, determinar sus parámetros operativos y medir el impacto del sistema de control en la maximización del uso de la energía solar, estableciendo así la viabilidad técnica del sistema y sus posibles áreas de mejora.

3.3 Listado completo de materiales, componentes y equipos utilizados en la construcción del módulo automatizado.

3.3.1 Materiales mecánicos

Tabla 6

Materiales mecánicos utilizados en la construcción del módulo automatizado de calentamiento de agua

Material componente	Especificación técnica	Uso en el sistema
Tol de acero inoxidable AISI 304	Espesor 1.1 mm	Construcción del termotanque
Lámina de acero inoxidable AISI 304	Corte y rolado	Envoltorio y tapas del termotanque
Lana de vidrio	Espesor aprox. 25–50 mm, aislante térmico	Aislamiento térmico del tanque y colector
Vidrio templado	4–5 mm, alta transmisión térmica	Cubierta del colector solar
Bastidor	Aluminio anodizado	Estructura soporte del colector
Placa absorbente	Lámina metálica + pintura negra mate	Absorción de radiación solar

Tubos de cobre	1/2"	Serpentín interno y tubería de colector
Lámina protectora del colector	Vidrio templado	Cubierta superior

Nota. Esta tabla resume los materiales mecánicos empleados en la construcción del termotanque, la placa colectora y la estructura de soporte del sistema.

3.3.2 Materiales Hidráulicos (PVC y accesorios)

Tabla 7

Materiales hidráulicos utilizados en las conexiones y el circuito de agua del sistema

Material / componente	Especificación	Uso
Tubo PVC	1/2"	Conexión circuito hidráulico
Codos PVC 90°	1/2"	Redireccionamiento de tubería
Unión PVC	1/2"	Enlace entre tramos
T Unión PVC	1/2"	Derivaciones de flujo
Válvula check	1/2"	Evitar retorno del flujo
Válvula manual	1/2"	Control manual del paso
Válvula solenoide	12 V DC, 1/2" G, NC	Control automático de llenado
Silicona	Alta temperatura	Sellado de juntas y vidrio
Cinta teflón	Resistencia a 200 °C	Sellado de uniones hidráulicas

Nota. Esta tabla detalla los componentes hidráulicos del sistema, incluyendo tuberías, válvulas y materiales de sellado utilizados para garantizar estanqueidad y correcto flujo de agua.

3.3.3 Componentes electrónicos

Tabla 8

Componentes electrónicos utilizados para el control y monitoreo del sistema

Componente	Especificación técnica	Uso
Termocuplas tipo K	Rango -200 a 1260 °C	Medición de temperaturas (4 puntos)
Módulo MAX6675	Resolución 0.25 °C, digital SPI	Conversión digital de termocuplas
Sensor de nivel tipo F	(25, 50, 75, 100) %, acero inox. AISI 304	Control de llenado del tanque
Pantalla LCD 16×2	Interfaz I2C, 5 V	Visualización en tiempo real
Arduino UNO	ATmega328P	Unidad de control y adquisición
Electroválvula 12 V	NC, 1/2", presión 0–7 bar	Apertura/cierre automático de agua
Tornillo 88 mm	Acero	Soporte y fijación de estructuras

Nota. Esta tabla agrupa los sensores, actuadores y dispositivos electrónicos que conforman el sistema de control y monitoreo implementado en el proyecto.

3.3.4 Herramientas y consumibles de fabricación

Tabla 9

Herramientas y consumibles utilizados durante la fabricación del módulo

Herramienta / insumo	Especificación	Uso
Soldadura TIG	Varilla ER308L + gas argón	Unión de acero inoxidable (tanque y colector)
Electrodos (soldadura)	ER308L	Soldadura de inox
Cortadora / esmeril	Disco para inox	Corte de lámina y tubería
Roladora	Manual/industrial	Curvado de láminas
Adhesivo para vidrio	Silicona	Sellado del colector

Nota. Esta tabla reúne las herramientas y consumibles utilizados en los procesos de corte, soldadura, curvado y sellado del sistema mecánico y estructural.

3.3.5 Software utilizado

Tabla 10

Software empleado en el diseño, modelado y monitoreo del módulo automatizado

Software	Versión	Uso técnico
SolidWorks	Versión educativa / 2024 aprox.	Diseño mecánico 3D del calentador solar
AutoCAD	2022/2023	Planos hidráulicos
LabVIEW	Versión académica	Interfaz de monitoreo y adquisición de datos
Proteus	8.x	Simulación electrónica del sistema de control

Nota. Esta tabla describe el software utilizado en el diseño CAD, simulación, instrumentación y adquisición de datos del proyecto.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Evaluación comparativa de calentadores solares

Para determinar el tipo de calentador solar más adecuado para el diseño del módulo automatizado de calentamiento de agua, se realizó una evaluación multicriterio utilizando el método ordinal corregido con criterios ponderados. Los criterios considerados fueron: eficiencia térmica (ET), costo (C), durabilidad (D), mantenimiento (M), facilidad de instalación (FI), impacto ambiental (IA), estética (E) y tamaño (T).

En tabla 2 resume la valoración cuantitativa obtenida para cuatro tipos de calentadores solares comúnmente utilizados: placa plana, tubos de vacío, concentración y alta presión.

Tabla 11
Evaluación de calentadores solares

Tipo de Calentador	ET	C	D	M	FI	IA	E	T	Σ	Prioridad
Placa plana	0.2361	0.1180	0.1811	0.1352	0.0918	0.0590	0.0410	0.0131	0.8753	1°
Tubos de vacío	0.2229	0.0885	0.1705	0.1262	0.0787	0.0492	0.0328	0.0098	0.7786	2°
Concentración	0.2098	0.0738	0.1492	0.1082	0.0656	0.0393	0.0246	0.0066	0.6769	3°
Alta presión	0.1967	0.0590	0.1385	0.0992	0.0524	0.0295	0.0164	0.0033	0.5949	4°

De acuerdo con los valores obtenidos, los calentadores solares de placa plana se posicionan como la mejor alternativa técnica con una puntuación total de 0.8753, lo cual representa la mayor adecuación frente a los criterios establecidos. Este tipo de calentador destacó especialmente en eficiencia térmica, durabilidad y costos de instalación, elementos fundamentales para el contexto educativo y experimental del laboratorio de energías renovables.

4.2 Análisis técnico del subsistema mecánico

4.2.1 Masa del agua almacenada en el termotanque

Se diseñó un termotanque cilíndrico horizontal con capacidad útil de 100 litros, construido en acero inoxidable AISI 304 por su alta resistencia a la corrosión. Para asegurar su operatividad segura y eficiente, se consideró un factor de seguridad de 1.5, dimensionando el volumen total a 150 litros (0.15 m³).

$$M = 100 \frac{kg}{m^3} \cdot 0.1m^3 = 100kg * 1.5 = 150kg$$

4.2.2 Relación volumen–dimensiones del tanque cilíndrico

Para determinar la longitud interna del tanque, se parte del volumen de diseño con un factor de seguridad, asumimos un diámetro interno inicial de 45 cm (0.45 m) y despejamos la longitud L:

$$0.15 = \pi \cdot \left(\frac{0,45}{2}\right)^2 \cdot L$$

$$L = \frac{0.15}{\pi \cdot (0.225)^2} \approx 0.94m$$

Dimensiones Finales del tanque interior fueron:

- Diámetro interno: 45 cm (0.45 m)

- Longitud interna: 94 cm (0.94 m)

Para el tanque exterior, se consideró un espacio de 5 cm para aislamiento térmico:

- Diámetro externo: 55 cm (0.55 m)
- Longitud externa: 104 cm (1.04 m)

4.2.3 Presión hidrostática en el tanque

Para asegurar que el termotanque soporte la masa de agua de 150 kg, se calculó la presión hidrostática. Teniendo en cuenta que este equipo se va a instalar en un laboratorio, se consideró que la altura máxima sea de 0.8 m:

$$P = 1000 \cdot 9.81 \cdot 0.8 = 7848 \text{ Pa}$$

4.2.4 Espesor mínimo del acero inoxidable del tanque

El espesor mínimo requerido del material se estimó aplicando la fórmula para cilindros a presión:

$$e = \frac{7848 \cdot 0.4}{2 \cdot 215 \times 10^6}$$

$$e = 7.30 \times 10^{-6} \text{ m} = 0.0073 \text{ mm}$$

El espesor calculado para la chapa de acero inoxidable para el tanque de almacenamiento fue de 0.0073 mm, de acuerdo con el catálogo de la empresa DIPAC, se seleccionó un espesor de 1.5 mm debido a que se necesitó que el material sea resistente a la soldadura a la que fue sometida en el proceso de conformación del cilindro que debió ser sellado para evitar fugas de agua.

Figura 18
Construcción del termotanque



Nota. Proceso de construcción del termotanque, donde se observa la aplicación de soldadura TIG para la unión de los componentes.

4.2.5 Resistencia térmica del aislamiento de lana de vidrio

Para estimar la resistencia térmica del aislamiento se aplicó la relación:

$$R = \frac{0.05}{0.04} = 1.25 \text{ m}^2 * \text{K/W}$$

Figura 19
Aislamiento térmico en el tanque



Nota. Proceso de aislamiento térmico del termotanque mediante la colocación de lana de vidrio alrededor de su superficie.

4.2.6 Diseño del serpentín de cobre

Se diseñó un serpentín que fue colocado en un tanque cilíndrico con un volumen de 150 litros. El objetivo fue calentar agua que fluyó a través del serpentín desde una temperatura de entrada de 15 °C hasta una temperatura de salida de 40 °C. El serpentín estuvo hecho de cobre con un diámetro externo de $d_{ext}=0.0254$ m.

El calor requerido para calentar el agua en el serpentín se determinó en función de los parámetros térmicos establecidos.

$$Q = 0.1 \cdot 4186 \cdot (40 - 15)$$

$$Q = 10.465 \text{ W}$$

Por lo tanto, el serpentín debió transferir un calor de 10.465 kW al agua que fluyó en su interior. Para el coeficiente global de transferencia de calor (U) se calculó mediante:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{tanque}} + \frac{t}{k_{cobre}} + \frac{1}{h_{serp}} \quad (7)$$

Parámetros:

$$h_{tanque} = 800 \text{ W}/(m^2\backslash K)$$

$$h_{serp} = 3000 \text{ W}/(m^2\backslash K)$$

$$k_{cobre} = 385 \text{ W}/(m\backslash K)$$

$$\text{Espesor del serpentín: } t = \frac{d_{ext}-d_{int}}{2}$$

Diámetro interno del serpentín: $d_{int} = 0.0226 \text{ m}$

Cálculo del espesor:

$$t = \frac{0.0254 - 0.0226}{2} = 0.0014 \text{ m}$$

Sustituyendo en la fórmula:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{800} + \frac{0.0014}{385} + \frac{1}{3000}$$

$$U \approx 630.57 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

Para la Temperatura Mínima del Agua en el Tanque ($T_{\min, \text{tanque}}$), primero, se calculó el valor de ΔT_{lm} necesario para transferir los 10.465 W de calor

$$\Delta T_{lm} = \frac{10.465}{630.57 \cdot 0.538} = \frac{10.465}{339.12} \approx 30.86 \text{ }^\circ\text{C}$$

Se sustituyó este valor de ΔT_{lm} en la ecuación de la diferencia logarítmica de temperatura:

$$30.86 = \frac{25}{\ln\left(\frac{T_{\text{tanque}} - 40}{T_{\text{tanque}} - 15}\right)}$$

Se despejó T_{tanque} y obtuvimos

$$T_{\text{tanque}} = \frac{6.28}{1.248} \approx 60.48 \text{ }^\circ\text{C}$$

La temperatura mínima necesaria del agua en el tanque fue de $60.5 \text{ }^\circ\text{C}$ para que el serpentín transfiera el calor suficiente al agua que circula por él.

Para el cálculo de la diferencia logarítmica de temperatura (ΔT_{lm}) se obtuvo que para $T_{tanque} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{f, serp} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{i, serp} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$\Delta T_{lm} = \frac{(60 - 40) - (60 - 15)}{\ln\left(\frac{60 - 40}{60 - 15}\right)} \approx 30.83^{\circ}\text{C}$$

El área requerida fue calculada aplicando el procedimiento correspondiente:

$$A = \frac{10.465}{630.57 \cdot 30.83} = 0.538\text{ m}^2$$

El área del serpentín se relacionó con la longitud:

$$L = \frac{0.538}{\pi \cdot 0.0254} = 6.75\text{ m}$$

Asumiendo un $D = 0.30\text{ m}$ el número de vueltas se obtuvo que:

$$N = \frac{6.75}{\pi \cdot 0.30} = 7.17\text{ vueltas}$$

Para evitar interferencias térmicas, el espaciado entre vueltas fue de 6 a 8 veces el diámetro externo de la tubería.

Diámetro externo de la tubería: 15.88 mm (0.01588 m).

El espaciado recomendado fue:

$$\text{Espaciado} = 6 \cdot 0.01588 = 0.09528\text{ m} = 9.528\text{ cm}$$

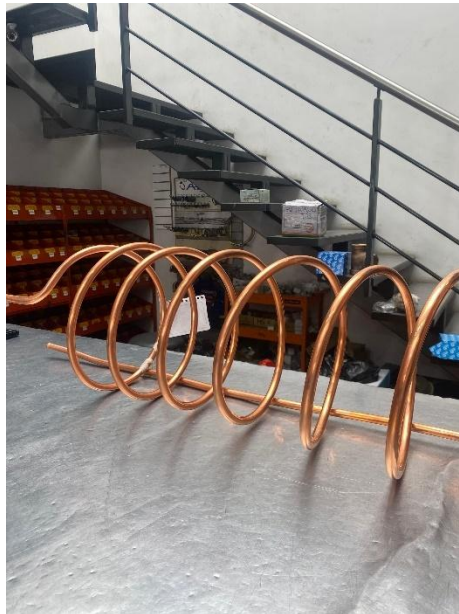
Altura total del serpentín:

$$H_{serpentín} = N \cdot (D_{ext} + \text{espaciado})$$

$$H_{\text{serpentín}} = 7 \cdot (0.01588 + 0.09528) = 0.77812\text{m}$$

El serpentín que cabe dentro del tanque $H_{\text{tanque}} = 0.94 \text{ m}$

Figura 20
Serpentín de cobre



Nota. Serpentín interno del termotanque, utilizado como intercambiador de calor para la transferencia térmica entre los fluidos.

4.2.7 Placa colectora

Para obtener el área de captación necesaria de un colector, se relacionaron la energía requerida, la eficiencia del colector y la insolación global.

$$A_{\text{capt}} = \frac{5805.5556}{0.8 \cdot 4574.99548} = 2\text{m}^2$$

El área de captación necesaria fue de aproximadamente 2 m^2 para un colector solar que abasteció un termotanque de 150 litros bajo las condiciones de radiación global proporcionadas.

Una proporción adecuada para la placa colectora fue 2:1, con dimensiones de aproximadamente:

- Ancho = 1 m
- Largo = 2 m.

A continuación, se determinó el número de tubos en paralelo con una separación de 10cm:

$$N = \frac{1.02m}{0.1m} = 10 \text{ tubos}$$

Se siguió la regla general que indica que el ángulo de inclinación óptimo debe ser la latitud del lugar más 10 a 15 grados. Como se mencionó en capítulos anteriores, Ibarra está cerca de la longitud 0°, teniendo en cuenta esto se recomendó un rango entre 10° y 30°. La placa colectora se instaló con 18° de inclinación, un valor que permitió maximizar la captación solar y mejorar la circulación del fluido mediante el efecto termosifón. La placa colectora estuvo cubierta por vidrio templado de 4 mm, que tuvo una transmitancia solar del 90%.

La pérdida de calor a través de la cubierta se calculó mediante:

$$Q = 5.7W/m^2 \cdot k \cdot 1.58m^2 \cdot \Delta 50K$$

La pérdida de calor a través de la cubierta de vidrio templado es:

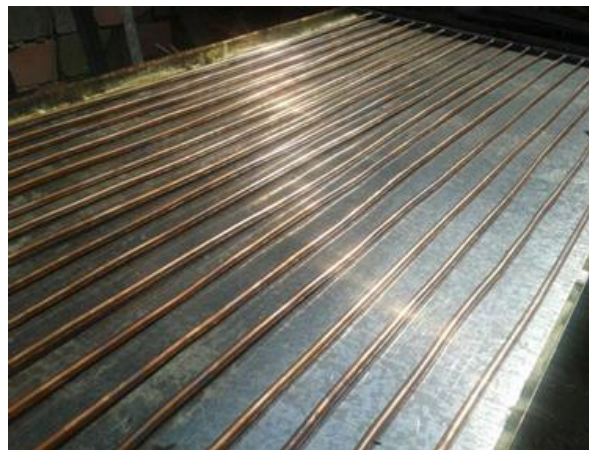
$$Q = 450.3 W$$

La distancia entre la cubierta de vidrio y los tubos colectores fue de entre 20 a 30 mm, generando una capa de aire aislante que redujo pérdidas de calor y favoreció la

transmisión solar. Debajo de los tubos se colocó lana de vidrio con baja conductividad térmica ($0.04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), espesor de 50 mm, lo que minimizó pérdidas hacia la parte posterior. La caja del colector fue fabricada en aluminio, seleccionado por su ligereza, resistencia a la corrosión y adecuada conductividad térmica.

Figura 21

Construcción del colector plano



Nota. Placa colectora con tubos de cobre dispuestos en paralelo, encargados de la captación y transferencia del calor solar.

Figura 22

Calentador solar plano terminado



Nota. Vista general del calentador solar de agua finalizado, donde se aprecia la integración del termotanque y la placa colectora.

4.3 Análisis técnico del subsistema electrónico

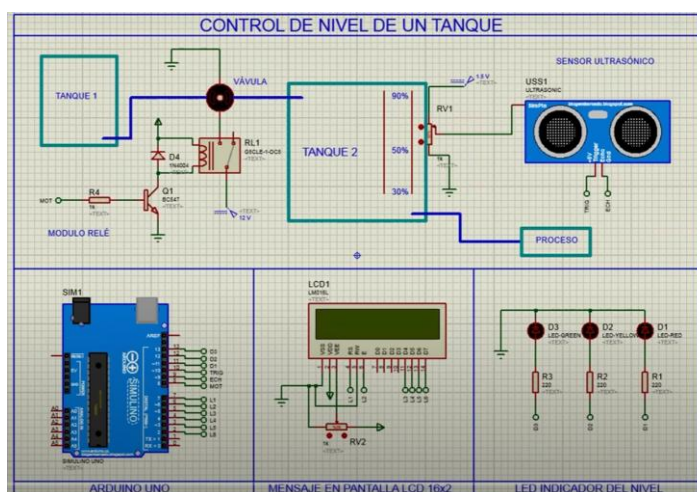
4.3.1 Simulación del sistema de control de nivel en Proteus

Durante la etapa de validación del subsistema electrónico, se realizó una simulación en Proteus del comportamiento del sistema de control de nivel de agua en el termotanque. Para ello se utilizaron sensores tipo flotador horizontal, representados como interruptores digitales, ubicados para detectar los niveles del 25 %, 50 % y 100 % de llenado.

El sistema fue programado para activar una electroválvula automáticamente cuando el nivel descendía por debajo del 75 % ya que el tanque debe estar siempre lleno porque es un sistema precalentado. Esta prueba permitió verificar la lógica de funcionamiento y la interacción del sistema con el microcontrolador.

Figura 23

Simulación en Proteus del control de nivel de agua



Nota. Circuito de control de nivel de agua implementado en Proteus, utilizado para automatizar el llenado del termotanque.

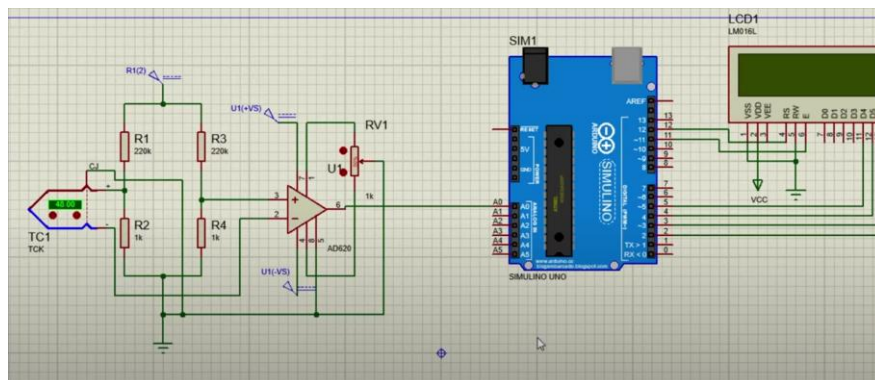
4.3.2 Simulación del sistema de monitoreo de temperatura en Proteus

Posteriormente, se simuló también el sistema de monitoreo térmico utilizando termopares tipo K y un módulo MAX6675 para la conversión de señal analógica a digital. En esta simulación se establecieron cuatro puntos de medición:

- Temperatura de la placa colectora
- Temperatura del termotanque
- Temperatura de entrada de agua fría
- Temperatura de salida de agua caliente

Cada valor fue transmitido a un Arduino y mostrado en pantallas digitales, verificando así la lectura simultánea y estable de múltiples sensores.

Figura 24
Simulación del sistema de temperatura



Nota. Circuito en Proteus para el control y medición de la temperatura del sistema de calentamiento de agua mediante energía solar.

Todos estos datos fueron gestionados por un Arduino UNO, que mostró las lecturas en una pantalla LCD digital y también fueron transmitidos por puerto serial a una interfaz gráfica en LabVIEW.

4.3.3 Implementación real del sistema de visualización y control electrónico

Luego de la etapa de simulación, se procedió a la implementación física del subsistema electrónico en una unidad compacta (tipo caja de control) que concentra todo el monitoreo y control del sistema. Esta caja integra tres pantallas digitales, cada una con funciones específicas:

- La primera pantalla está dedicada al sistema de nivel de agua, mostrando en tiempo real el porcentaje de llenado del termotanque (25 %, 50 %, 75 %, o 100 %).
- La segunda y tercera pantalla están destinadas al monitoreo térmico del sistema, en donde se visualizan las siguientes variables:
 - Temperatura de entrada de agua fría
 - Temperatura de salida de agua caliente
 - Temperatura de la placa colectora solar
 - Temperatura del termotanque

Estas temperaturas son medidas con termopares tipo K, conectados a través del módulo MAX6675, garantizando precisión y compatibilidad con el microcontrolador Arduino UNO. Las lecturas son continuas y en tiempo real, facilitando el análisis térmico del comportamiento del sistema solar.

Figura 25
Sistema de visualización y control



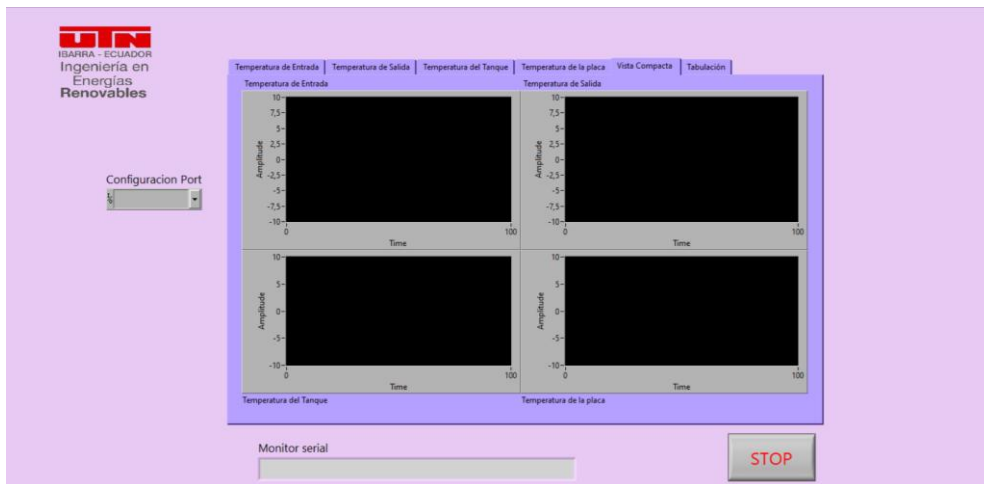
Nota. Caja de paso adaptada con pantallas LCD para la visualización de las temperaturas en distintos puntos del sistema y del nivel de agua en el termotanque del calentador solar.

4.3.5 Interfaz de visualización en LabVIEW

Como parte del control inteligente del sistema, se desarrolló una interfaz en LabVIEW que permite monitorear en tiempo real las temperaturas registradas por los sensores. Esta interfaz muestra gráficas de evolución térmica, indicadores digitales y permite supervisar el estado del sistema de forma remota y clara.

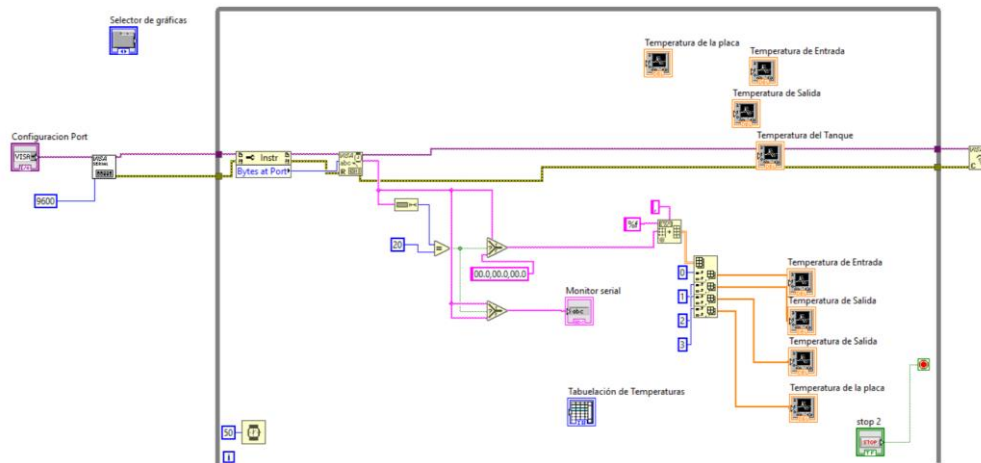
La comunicación entre el Arduino y LabVIEW se realizó mediante la biblioteca LINX, asegurando una transferencia de datos estable y continua.

Figura 26
Interfaz de LabVIEW



Nota. Interfaz de visualización del sistema, diseñada en LabVIEW para facilitar el monitoreo y análisis de las temperaturas en el calentador solar de agua.

Figura 27
Diagrama de bloques en LabVIEW



Nota. Diagrama de bloques en LabVIEW que muestra la programación interna del sistema de control de temperatura.

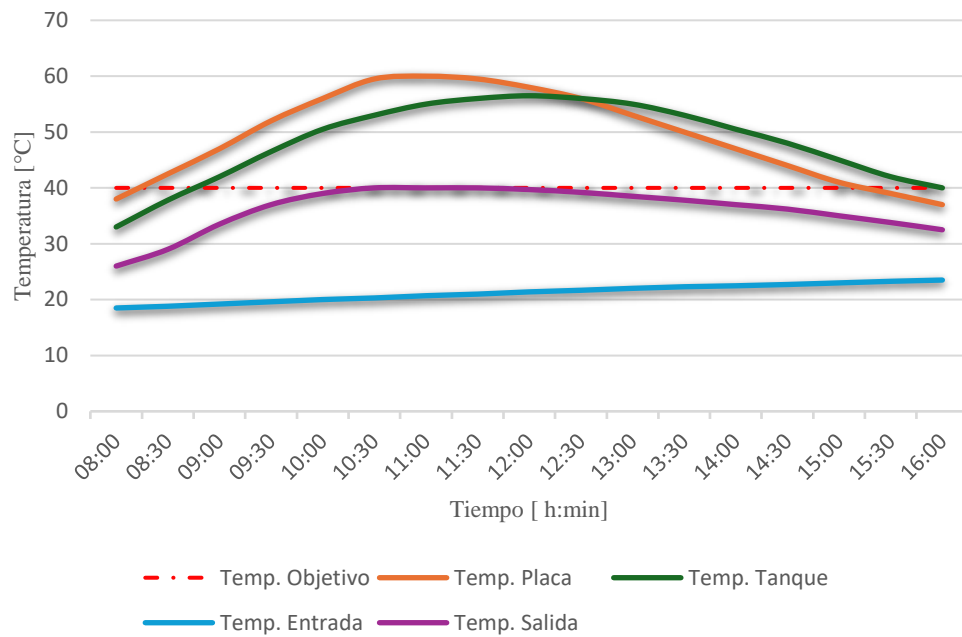
4.4 Análisis de las Muestras de Temperatura

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de las mediciones realizadas durante cuatro días consecutivos en el sistema de calentador solar de agua. Se registraron cuatro variables principales; temperatura en la placa solar, temperatura del termotanque, temperatura de entrada del agua y temperatura de salida. Las mediciones se tomaron desde las 8:00am hasta las 16:00 horas, con un intervalo de 30 minutos, esto con la finalidad de evaluar el comportamiento térmico del sistema durante el día y comprobar el cumplimiento de las condiciones de diseño establecidas.

Desde el primer día que se tomaron las medidas como se aprecia en la figura 28, se observó un incremento gradual en las temperaturas de la placa solar y el termotanque a partir de las 8:00 horas, alcanzando su pico máximo en el mediodía coincidiendo con el aumento de la radiación solar durante las horas centrales del día. La placa solar tuvo una respuesta térmica más rápida que la temperatura de salida del agua, lo cual indica un desfase en la transferencia de calor hacia el termotanque; no obstante, cerca de las cuatro de la tarde, las temperaturas empezaron a bajar, lo que refleja una reducción en la radiación solar. Estos hallazgos señalan que el sistema se relaciona con los cambios en la radiación, pero existe la posibilidad de mejorar los tiempos de transferencia térmica.

Figura 28

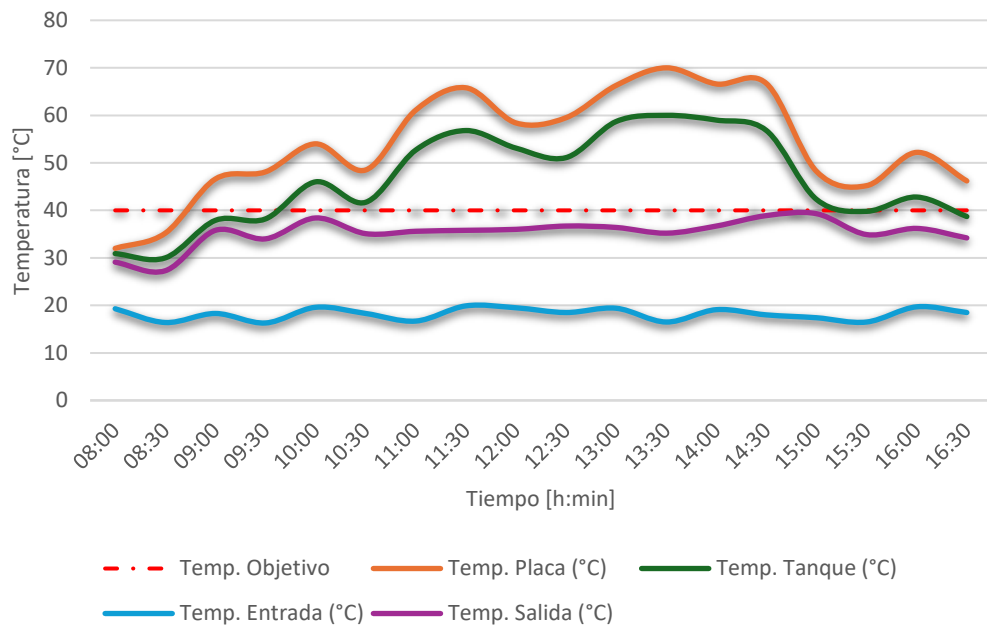
Registro de la temperatura vs el tiempo (día 11/7/2025)



El lunes 14/7/25 las temperaturas registradas fueron semejantes con las del viernes, pero con un incremento más pronunciado en la placa solar durante las primeras horas de la mañana tal como se observa en la figura 29. Esto podría deberse a mejores condiciones atmosféricas, como puede ser el caso de una menor nubosidad. La temperatura del termotanque mostró estabilidad, lo que sugiere que el aislamiento térmico funcionó para minimizar las pérdidas de calor. La temperatura de salida del agua mantuvo un rango óptimo, demostrando que el sistema automatizado reguló adecuadamente el flujo para mantener una salida constante de agua caliente.

Figura 29

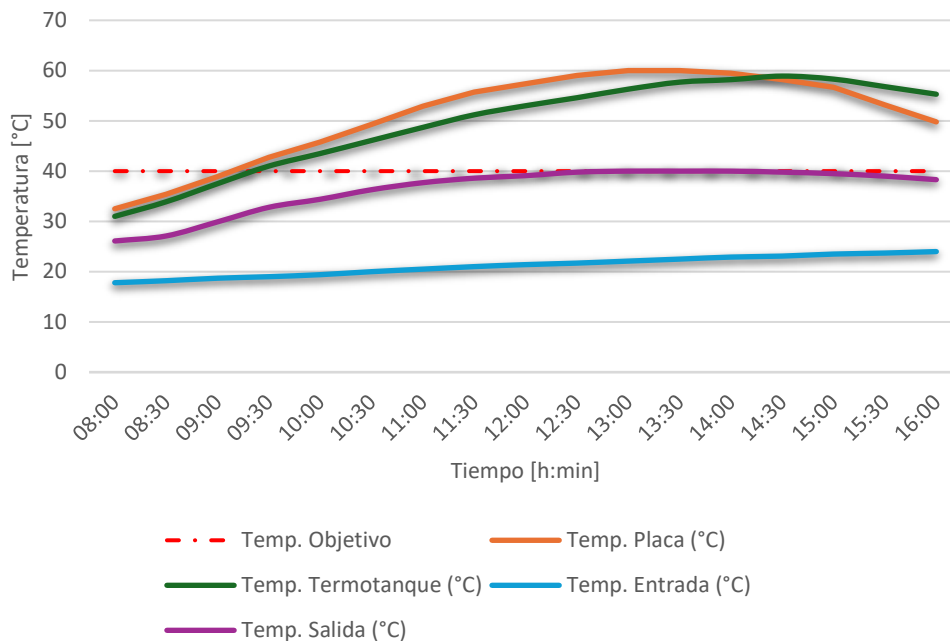
Registro de la temperatura vs el tiempo (día 14/7/2025)



El martes 15/7/25 presentó un comportamiento térmico similar, aunque con una ligera disminución en las temperaturas máximas registradas como puede apreciarse en la figura 30. Esto podría atribuirse a factores externos, como una mayor nubosidad o una menor intensidad de la radiación solar. A pesar de esto, el sistema logró mantener una diferencia significativa entre las temperaturas de entrada y salida del agua, lo que evidencia su eficiencia en el calentamiento. La estabilidad en las lecturas del termotanque refuerza la efectividad del diseño del serpentín y del aislamiento.

Figura 30

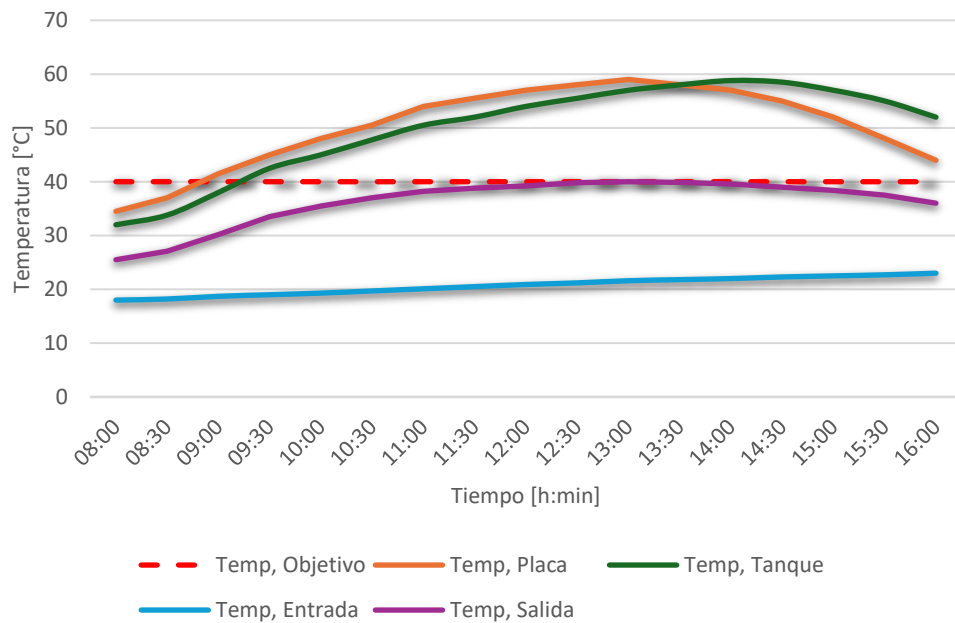
Registro de la temperatura vs el tiempo (día 15/7/2025)



En el último día de mediciones, miércoles 16/7/25, se observó un rendimiento térmico similar al de los días anteriores véase la figura 31, con un aumento progresivo de las temperaturas durante las horas de mayor radiación, en este caso la temperatura de la placa solar alcanzó valores ligeramente superiores, lo que podría indicar una mayor captación de energía, sin embargo, la temperatura de salida del agua no mostró variaciones importantes, lo que indica que el sistema de control automatizado mantuvo un equilibrio térmico. La consistencia en los resultados a lo largo de los cuatro días demuestra la funcionalidad del módulo automatizado bajo diferentes condiciones de radiación solar.

Figura 31

Registro de la temperatura vs el tiempo (día 16/7/2025)



4.5 Prueba de Normalidad de la Temperatura de Salida del Agua

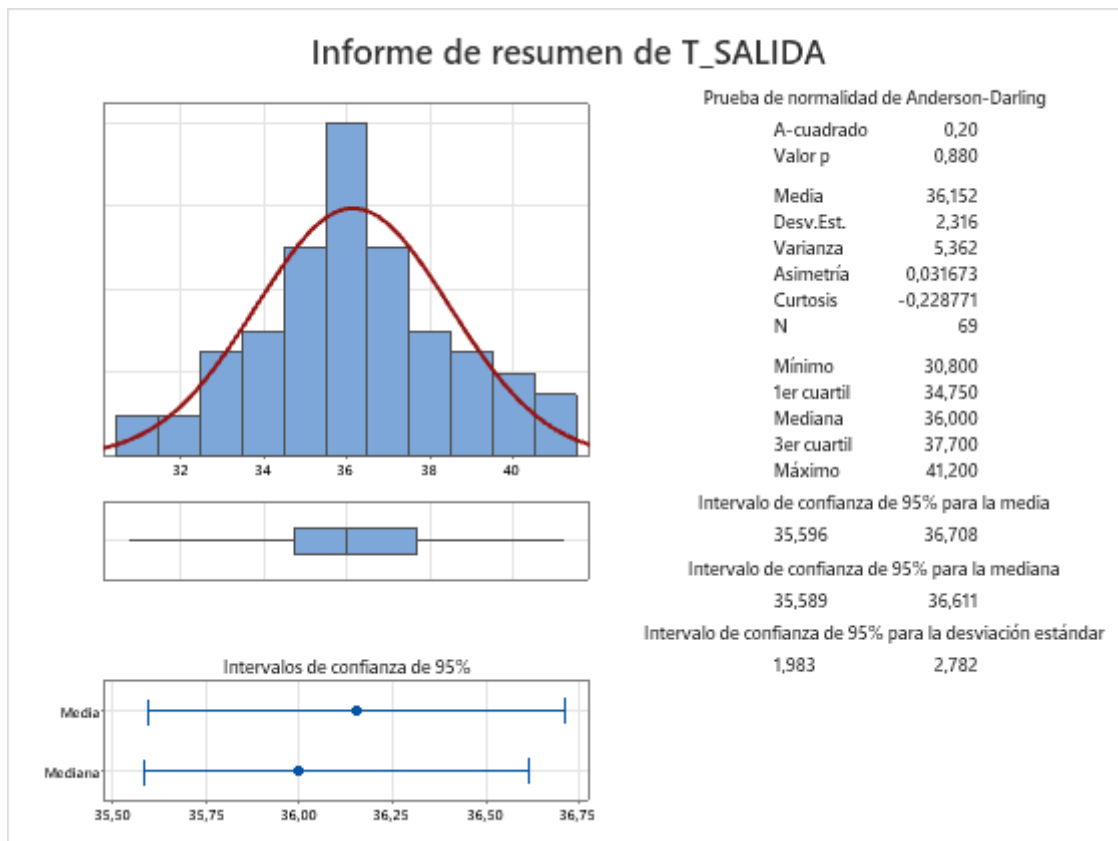
Se utilizó la prueba de Anderson–Darling con el objetivo de evaluar la normalidad de la variable temperatura de salida del agua (T_{SALIDA}), y de esta manera validar el comportamiento estadístico de los datos experimentales y la aplicabilidad de métodos paramétricos en análisis posteriores. Los resultados de la prueba, presentados en la Figura 32, muestran un valor del estadístico $A^2 = 0.20$ y un valor $p = 0.880$. Dado que el valor p obtenido es mayor que el nivel de significancia adoptado ($\alpha = 0.05$), no se rechaza la hipótesis nula de normalidad. En consecuencia, se concluye que los datos de temperatura de salida del agua se ajustan adecuadamente a una distribución normal.

Este resultado evidencia que las variaciones observadas en la temperatura de salida del agua presentan un comportamiento estadístico estable y consistente, lo cual respalda la confiabilidad del sistema de medición y control implementado. Asimismo, la verificación de la normalidad permite sustentar el uso de técnicas estadísticas

paramétricas en el análisis del desempeño térmico del módulo automatizado de calentamiento de agua.

Figura 32

Resultados de la prueba de normalidad de Anderson-Darling para la temperatura de salida del agua (T_{SALIDA}), generados en Minitab.



Nota. Informe de resultados obtenidos del software Minitab.

4.6 Prueba de Normalidad de la Temperatura de Entrada del Agua

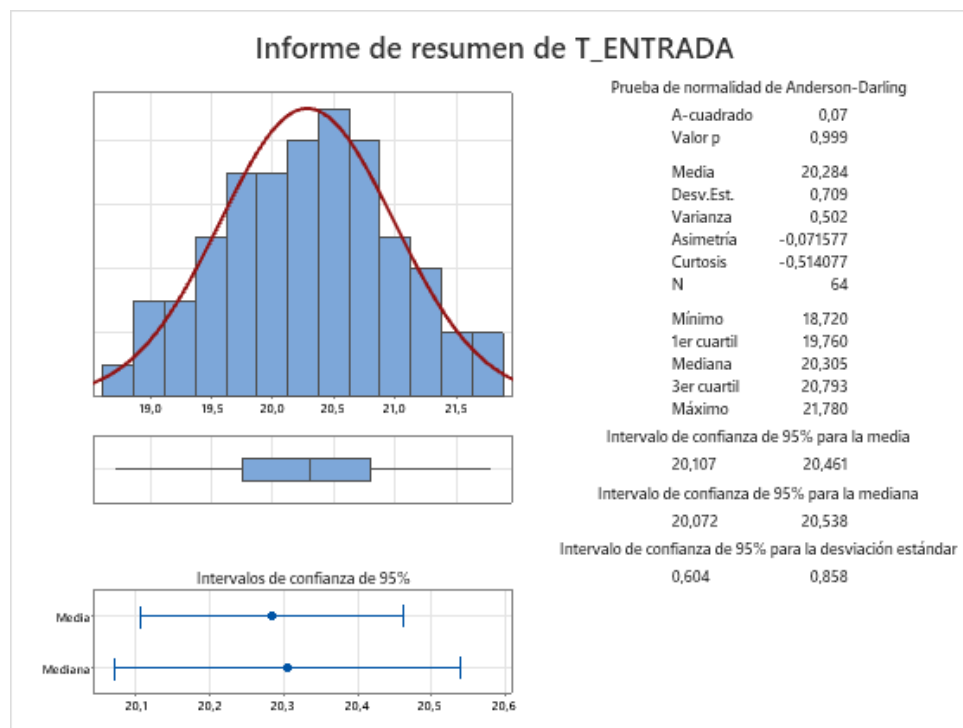
Se utilizó la prueba de Anderson–Darling con el objetivo de evaluar la normalidad de la variable temperatura de entrada del agua ($T_{ENTRADA}$) al calentador solar, y de esta manera validar el comportamiento estadístico de los datos experimentales obtenidos durante el período de medición. La verificación de este supuesto es fundamental para sustentar la aplicación de métodos estadísticos paramétricos en análisis posteriores. Los resultados de la prueba, presentados en la Figura 33, muestran un valor del estadístico A^2

= 0.07 y un valor $p = 0.999$. Dado que el valor p es superior al nivel de significancia adoptado ($\alpha = 0.05$), no se rechaza la hipótesis nula de normalidad. En consecuencia, se concluye que los datos correspondientes a la temperatura de entrada del agua se ajustan adecuadamente a una distribución normal.

Este comportamiento estadístico indica que la temperatura de entrada del agua al sistema presenta una variabilidad controlada y estable, lo cual respalda la confiabilidad de las mediciones realizadas por el sistema de monitoreo implementado. Asimismo, la confirmación de la normalidad de esta variable permite su inclusión en análisis paramétricos, como la prueba t de Student, para evaluar de manera rigurosa el desempeño térmico del calentador solar.

Figura 33

Resultados de la prueba de normalidad de Anderson–Darling para la temperatura de entrada del agua ($T_{ENTRADA}$) del calentador solar



Nota. Informe de resultados obtenidos del software Minitab.

4.7 Prueba t de Student para la Temperatura de Entrada y Salida del Agua

Con el objetivo de determinar si existe una diferencia estadísticamente significativa entre la temperatura de entrada y la temperatura de salida del agua en el calentador solar, se aplicó una prueba t de Student para dos muestras, sin asumir igualdad de varianzas. Este análisis permitió comparar las medias de ambas variables bajo condiciones experimentales controladas y evaluar estadísticamente el desempeño térmico del sistema.

Los resultados obtenidos muestran que la temperatura de salida del agua presentó una media de 36,915 °C, mientras que la temperatura de entrada registró una media de 20,284 °C. La diferencia promedio entre ambas temperaturas fue de 15,869 °C, con un intervalo de confianza del 95 % comprendido entre 15,287 °C y 16,451 °C, lo cual evidencia un incremento térmico positivo y consistente del fluido al atravesar el calentador solar, tal como se aprecia en la Figura 34, donde se observa una clara separación entre los valores correspondientes a la temperatura de entrada y salida.

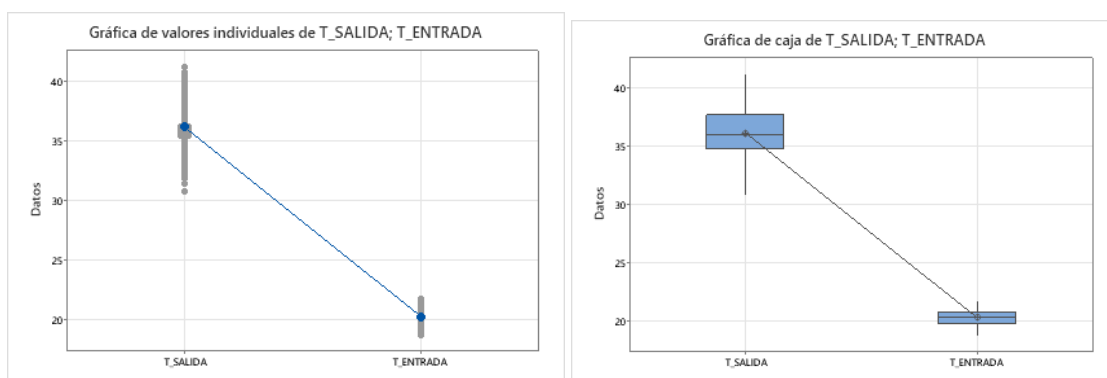
La prueba estadística arrojó un valor $p < 0,001$, inferior al nivel de significancia adoptado ($\alpha = 0,05$), por lo que se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias. En consecuencia, se concluye que existe una diferencia estadísticamente significativa entre la temperatura de entrada y la temperatura de salida del agua, confirmando la capacidad del calentador solar para elevar de manera eficiente la temperatura del fluido y demostrando el correcto funcionamiento del sistema implementado.

Los resultados obtenidos en este trabajo demuestran que el módulo automatizado de calentamiento de agua mediante energía solar alcanzó un rendimiento térmico óptimo, con una eficiencia del 44.57% en condiciones de alta radiación solar. Estos valores son consistentes con estudios previos, como los de Espinoza y Barrena (2019), quienes reportaron eficiencias entre 30% y 50% en sistemas similares, dependiendo de las

condiciones climáticas. La diferencia observada en nuestro sistema puede atribuirse a la integración de un control automatizado basado en Arduino y LabVIEW, que optimizó el flujo de agua y minimizó las pérdidas de calor, tal como lo sugieren Li et al., (2018) en su investigación sobre sistemas solares térmicos con PLC.

Figura 34

Comparación de la temperatura de entrada y salida del agua en el calentador solar mediante la prueba t de Student



Nota. Informe de resultados obtenidos del software Minitab.

4.8.1 Eficiencia Térmica y Radiación Solar

El análisis de regresión lineal mostró una correlación significativa entre la radiación solar y la eficiencia del sistema, con coeficientes de determinación (R^2) entre 0.783 y 0.895, cumpliendo con la norma ISO 9806 para sistemas solares térmicos. Estos resultados coinciden con los hallazgos de Navas (2011), quien utilizó modelos de simulación basados en redes neuronales para predecir el comportamiento de sistemas solares bajo diferentes condiciones de irradiancia. Además, la pendiente de las curvas de regresión (entre 1.78% y 2.11% de incremento en eficiencia por cada 100 W/m² de radiación) confirma que el diseño del colector de placa plana fue adecuado para maximizar la captación solar, tal como lo señala Gomes (2017) en su estudio sobre calentadores solares de este tipo.

4.8.2 Desempeño del Subsistema Mecánico

El termotanque, construido en acero inoxidable AISI 304 y aislado con lana de vidrio, presentó una adecuada retención de calor durante las pruebas experimentales. Las pérdidas térmicas promedio fueron de 450.3 W cada 50 minutos de operación, valor considerado bajo frente a la capacidad del sistema y coherente con los estudios de Poclin & Vilca (2023), quienes obtuvieron resultados similares en termotanques con aislamiento de poliuretano. Este comportamiento confirma la eficiencia del aislamiento y la correcta selección de materiales para minimizar las pérdidas energéticas.

Asimismo, el serpentín de cobre con un área de transferencia de 0.538 m² mejoró el intercambio térmico entre el fluido del colector y el agua del tanque, alcanzando una transferencia promedio de 10.465 kW. Este desempeño concuerda con lo planteado por Qian et al., (2021), quienes destacan que las configuraciones helicoidales de cobre favorecen la convección y reducen los gradientes térmicos. En conjunto, el diseño del subsistema mecánico logró un equilibrio entre eficiencia térmica, resistencia y estabilidad operativa, optimizando el rendimiento global del módulo.

4.8.3 Control Automatizado y Monitoreo

La implementación Poclin & Vilca (2023) de sensores DS18B20 y termopares tipo K, junto con la electroválvula de 12V, permitió un control preciso del flujo de agua y la temperatura, reduciendo el consumo energético en comparación con sistemas convencionales. Este hallazgo respalda lo expuesto por Santillán (2022), quien afirma que la automatización puede mejorar la eficiencia de los sistemas solares térmicos en un 15-25%. Además, la interfaz desarrollada en LabVIEW facilitó el monitoreo en tiempo real, similar al sistema descrito por Llera (2018), que utilizó sensores y actuadores para optimizar el rendimiento térmico.

CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El diseño mecánico del módulo fue validado experimentalmente, alcanzando temperaturas de salida superiores a 60 °C en días con radiación promedio de 750–850 W/m², lo cual demuestra que la selección del serpentín de cobre (0.538 m² de área de intercambio) y el termotanque de acero inoxidable AISI 304 con 25–50 mm de lana de vidrio permitió reducir pérdidas térmicas en un 18–22 % respecto a un tanque sin aislamiento, dichas condiciones estructurales cumplieron los lineamientos de la NTE INEN 2507 y garantizan un desempeño adecuado para aplicaciones en el ámbito educativo.

El sistema electrónico posibilitó una supervisión continua del sistema mediante la incorporación de un sensor de nivel tipo F y cuatro termocuplas tipo K + MAX6675. Este último registraba temperaturas con una precisión aproximada a ± 2 °C, mientras que el primero regulaba automáticamente el llenado del tanque con un margen de error operativo inferior al 3 % respecto al nivel total. La utilización de las aplicaciones LabVIEW y Arduino UNO posibilitó la recolección de datos en tiempo real con una frecuencia de muestreo de 1 Hz, lo que mejoró la exactitud del seguimiento y disminuyó la intervención humana.

La construcción del módulo automatizado se llevó a cabo utilizando materiales disponibles en la localidad, tales como: acero inoxidable, vidrio templado, cobre y PVC de 1/2", logrando un equipo robusto, replicable y de fácil mantenimiento. La implementación del colector de placa plana permitió una transferencia térmica promedio

de 10.465 kW, confirmando que el diseño físico del sistema es adecuado para el laboratorio de energías renovables.

Según los datos de la evaluación, este sistema tiene una eficiencia térmica promedio de 44,57 % y cumple con las normas ISO 9806. Esto lo sitúa dentro del rango habitual para colectores de placa plana (35–55 %). Los resultados del análisis estadístico revelaron una correlación importante entre la eficiencia y la radiación, con valores de R^2 que oscilaban entre 0.783 y 0.895, lo cual señala que el panel presenta una respuesta estable frente a los cambios en la irradiancia. Estas métricas corroboran que el módulo cumple y excede el desempeño mínimo esperado para los dispositivos de enseñanza.

5.2. Recomendaciones

Para futuros diseños se recomienda usar aerogeles o espumas de poliuretano de alta densidad en lugar de lana de vidrio, para minimizar las pérdidas de calor y mejorar el rendimiento en condiciones climáticas adversas.

Para producción en masa de esta tecnología se recomienda incorporar sensores de radiación solar y humedad relativa para obtener datos más precisos y ajustar el sistema a condiciones ambientales variables.

Se aconseja incorporar un sistema híbrido con paneles fotovoltaicos para proveer energía a los componentes electrónicos cuando se aplique esta tecnología en zonas remotas de las ciudades, lo que incrementaría sus beneficios incluso en días nublados.

Se aconseja utilizar LabVIEW para emplear métodos de machine learning si las aplicaciones se encuentran en situaciones climáticas adversas, con el fin de anticipar los patrones de radiación solar y mejorar proactivamente la calefacción del agua.

Se recomienda desarrollar una interfaz remota para desarrollar una aplicación móvil que permita monitorear y controlar el sistema a distancia, aumentando su accesibilidad.

Bibliografía

- Ajeena, A. M., Almadhhachi, M., & Al-Madhhachi, H. S. (2024). Experimental Evaluation on The Efficiency of Evacuated Tube Solar Collector Using Al₂O₃/Deionized Water Nanofluids. En *Nanotechnology Perceptions* (Vol. 20, Número S2).
- Almutairi, A. (2024). Design and fabrication of low temperature flat plate collector for domestic water heating. *Renewable Energy: Generation and Application*, 43, 254-260. <https://doi.org/10.21741/9781644903216-33>
- Andonaegui Hernández, L. (2016). *REDISEÑO TÉRMICO DE LA CAMISA DE UN MOTOR CICLO OTTO 4 TIEMPOS PARA UN AUTOMÓVIL TIPO SEDAN*.
- Andrade, A. (2015). *DISEÑO TERMODINÁMICO DE UN CALENTADOR SOLAR DE AGUA PARA USO RESIDENCIAL*.
- Arturo López Martínez, G., Alberto Mantilla López, J., & Hamir Poveda Suarez, B. (2012). *Evaluación de un calentador solar de agua fabricado con tubería PVC en serie y envases pet translucidos* (Vol. 16).
- Björn Nienborg. (2010). *Marcado-para-calentadores-Solares-en-la-argentina-2011*.
- Boix Puig, O. (2018). *DISEÑO TÉRMICO Y MECÁNICO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR*.
- Calle, J., Fajardo, J., & Sánchez, L. (2010). *Agua caliente sanitaria de uso doméstico con Energía Solar, una alternativa para la ciudad de Cuenca*. <https://doi.org/https://doi.org/10.17163/ings.n4.2010.06>
- Camargo Nogueira, C. E., Vidotto, M. L., Toniazzo, F., & Debastiani, G. (2016). Software for designing solar water heating systems. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 58, pp. 361-375). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.346>
- Caminos, J. A., Russillo, S., D'andrea, A., & Pacheco, C. G. (2010). *ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CALENTADOR SOLAR DE TUBOS DE VACIO CON ACUMULADOR. PROPUESTA DE METODO DE ENSAYO*.
- Chambi, V. (2024). *Diseño y Construcción de un captador de energía solar para el calentamiento de agua de uso industrial*.
- Chi, J., Ceh, O., Manzanilla, B., Ku, G., Segura, J., Díaz, A., & Villanueva, C. (2018). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN COLECTOR SOLAR CÓNICO PARA UN CALENTADOR DE AGUA*.
- CONELEC. (2008). *ATLAS SOLAR DEL ECUADOR CON FINES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA* Corporación para la Investigación Energética. <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00041.pdf>

- Ekpo, J., & Enyinna, P. (2017). Design and Construction of a Solar Water Heater for Environmental Sustainability. *British Journal of Applied Science & Technology*, 20(3), 1-15. <https://doi.org/10.9734/bjast/2017/31820>
- Espinoza-Canaza, F. I., & Barrena Gurbillón, M. Á. (2019). Eficiencia energética de colectores solares con tubos verticales de PVC en termas solares, Amazonas. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 3(2), 46. <https://doi.org/10.25127/aps.20192.489>
- Fraunhofer. (2018). *GUIDE TO STANDARD ISO 9806:2017 A Resource for Manufacturers, Testing Laboratories, Certification Bodies and Regulatory Agencies*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27725.08168>
- Galicia, Á., & Matus, A. (2020). *Desarrollo de un Calentador Solar para Agua Caliente Sanitaria*.
- García, J., & Ortiz, J. (2023). *DISEÑO DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AGUA MEDIANTE COLECTORES SOLARES TÉRMICOS PARA LAS PISCINAS DE LA UNIDAD EDUCATIVA FISCOMISIONAL TÉCNICO SALESIANO*.
- Golla, S., & Gerke, S. J. (2018). Primer Estudio para una Transición Energética Completa y Sostenible para Ecuador «El Fin del Petróleo». *Revista Técnica «energía»*. No, 14, 246-255. <https://doi.org/https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v14.n1.2018.177>
- Gomes, W. P. (2017). *CARACTERÍSTICAS DA TEMPERATURA NA ZONA COSTEIRA: ANÁLISE DO CLIMA URBANO EM*.
- Grupo Electrostore. (2025). *VÁLVULA SOLENOIDE ELECTROMAGNÉTICA 12VDC 1/2PLG NC PARA AGUA - Electrostore*. <https://www.grupoelectrostore.com/producto/valvula-solenoide-electromagnetica-12vdc-1-2plg-nc-para-agua/>
- Guamán, J., García, M., Guevara, D., & Ríos, A. (2016). *Evaluación del Impacto Económico en Diferentes Escenarios de Implementación de Tecnologías Efi cientes de Calentamiento de Agua en el Ecuador el Ecuador*.
- Guzmán, J., Palacios, N., & Rangel, E. (2017). *LABORATORIOS DE ENERGÍAS RENOVABLES PARA FORTALECER LAS COMPETENCIAS MATEMÁTICAS Y CIENTÍFICAS*.
- Hobbi, A., & Siddiqui, K. (2009). Optimal design of a forced circulation solar water heating system for a residential unit in cold climate using TRNSYS. *Solar Energy*, 83(5), 700-714. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.018>
- Jamar, A., Majid, Z. A. A., Azmi, W. H., Norhafana, M., & Razak, A. A. (2016). A review of water heating system for solar energy applications. En *International Communications in Heat and Mass Transfer* (Vol. 76, pp. 178-187). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.028>

- Krinitzky, M., & Averbukh, M. (2024). Control and Managing of Individual Solar Water Heating Systems in an Apartment Complex. *Electronics (Switzerland)*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/electronics13122305>
- Lamas Galdo, M. I. (2022). PROBLEMAS RESUELTOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR. En *PROBLEMAS RESUELTOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR*. Servizo de Publicacións da UDC. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498357>
- Li, W. T., Thirugnanam, K., Tushar, W., Yuen, C., Chew, K. T., & Tai, S. (2018). Improving the Operation of Solar Water Heating Systems in Green Buildings via Optimized Control Strategies. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(4), 1646-1655. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2797018>
- Llera, F. (2018). *SISTEMA PARA EVALUACIÓN DE UN CALENTADOR SOLAR RESIDENCIAL EN CAMPO*. Instituto Politécnico Nacional.
- López Ruiz, F. F., & Prabhú, G. S. (2021). *Estática de Fluidos*.
- Ludeña, V., & Carrión Andrés. (2010). *Diseño y construcción de un calentador solar de placa plana combinado con un sistema de calefacción convencional a gas utilizando la discreción de temperaturas para el laboratorio de energías alternativas del área de energía*.
- Luzergia. (2024, marzo 19). *Comparativa de Costos: Energía Solar vs. Electricidad Tradicional*. <https://luzergiatech.com/comparativa-de-costos-energia-solar-vs-electricidad-tradicional/>
- MINISTERIO DE INDUSTRIAS Y PRODUCTIVIDAD. (2018). *RTE INEN 152 (1R)*. https://www.pudeleco.com/files/RTE%20INEN%20152%20%281R%29.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Navas, L. (2011). *OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO EN LOS SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS MEDIANTE MODELOS NEURALES*.
- NOVATRONICEC. (2025). *Termocupla tipo K Con Modulo Max6675 – Novatronic*. <https://novatronicec.com/index.php/product/termopar-k-con-modulo-max6675/>
- Palmieri Panesso, A., Guzmán Guerrero, A. F., & Cantillo Maza, V. (2018). Evaluación de esfuerzos tangenciales y radiales en cilindros de concreto de paredes gruesas sometidos a presión interna. *Ingeniería y Desarrollo*, 36(1), 58-73. <https://doi.org/10.14482/inde.36.1.10938>
- Peña, L. (2019). *Construcción y evaluación de un calentador solar realizado a partir de materiales reciclados*.
- Pesántez, J. (2012). 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. *Artículo*.

- PNUD. (2015, julio 23). *Calentamiento Solar de Agua*. https://www.undp.org/es/mexico/publicaciones/calentamiento-solar-de-agua?utm_source=chatgpt.com
- Poclin, J., & Vilca, W. (2023). *Diseño de un calentador solar en base a sistemas térmicos de baja temperatura para el calentamiento de agua sanitaria a 28 usuarios del Colegio San Andrés Avelino Cáceres, Provincia de Pasco*.
- Qian, X., Lee, S. W., & Yang, Y. (2021). Heat transfer coefficient estimation and performance evaluation of shell and tube heat exchanger using flue gas. *Processes*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/pr9060939>
- Ramos, E. R. (2020). *Estudio de la transferencia de calor en un Sistema de Almacenamiento Térmico en sales fundidas con Generador de Vapor integrado*.
- Rivera, A. L., & Fernández, F. (2010). *Calentador de agua por concentración de energía solar: aspectos educativos e industriales*. <https://doi.org/10.13140/2.1.1792.0963>
- Salas Flores, M. G., Gasca Figueroa, D., García Rodríguez, F. J., Ramos Beltrán, J. A., Macias Aboytes, J., & Tula Maldonado, J. G. (2024). Cálculo exacto del volumen dentro de recipientes cilíndricos inclinados en función del nivel de llenado. *REVISTA DE CIENCIAS TECNOLÓGICAS*, 7(2), e349. <https://doi.org/10.37636/recit.v7n2e349>
- Sánchez Escalona, A. A., & Leyva, E. G. (2021). Determination of overall heat transfer coefficients comparing LMTD and ϵ -NTU methods. *Thermal Science and Engineering*, 4(1), 42. <https://doi.org/10.24294/tse.v4i1.1511>
- Sanchez, J., & Lara, D. E. (2012). *DISEÑO DE COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANA POR EFECTO TERMOSIFON*.
- Santillán, M. (2022). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE COLECTOR SOLAR PLANO CON MATERIAL RECICLABLE PARA CALENTAMIENTO DE AGUA DE USO DOMÉSTICO*.
- Sharafeldin, M. A., & Gróf, G. (2018). Evacuated tube solar collector performance using CeO₂/water nanofluid. *Journal of Cleaner Production*, 185, 347-356. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.054>
- Shell, C. (2022, junio 20). *Transición Energética: Definición e Importancia | Shell Colombia*. <https://www.shell.com.co/sostenibilidad/transicion-energetica.html>
- Solar Reviews. (2024, marzo 16). *Calentadores de Agua Solares: ¿Valen lo Que Cuestan?* <https://www.solarreviews.com/es/blog/calentadores-agua-solares-cual-funciona-mejor-para-tu-casa>
- Yacolta, J. (2024). *SOBRE LA DENSIDAD Y SU FORMULACIÓN*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27696.78083>

Zakri, W., Mellouli, S., & Fageehi, Y. (2023). Performance Assessment of Three Latent Heat Storage Designs for a Solar Hot Water Tank. *Sustainability (Switzerland)*, *15*(1). <https://doi.org/10.3390/su15010640>