

**TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE
TIANGUISTENCO**

TESIS

**IMPLEMENTAR HERRAMIENTAS DE MEJORA CONTINUA PARA EVALUAR EL
RENDIMIENTO DE CALENTADORES SOLARES EN UNA ESCUELA DE EDUCACIÓN
SUPERIOR.**

MARÍA LETICIA MÁRQUEZ BOBADILLA

202228021

DIRECTOR

ING. JOSÉ ALBERTO CRUZ ROMERO

CODIRECTOR

**M.C. VICTOR MANUEL FERREYRA
COROY**

**NOMBRE Y FIRMA DEL ASESOR
EXTERNO**

**NOMBRE Y FIRMA DEL ASESOR
INTERNO**

SANTIAGO TILAPA, ABRIL, 2026

Agradecimientos

A la vida y a todas mis bendiciones, por darme lo más valioso que poseo: el tiempo y la oportunidad de seguir construyendo mi camino. Agradezco los desafíos, las lecciones y las personas que he encontrado en cada etapa. Todo lo que he logrado ha sido fruto de mi esfuerzo, mis decisiones y mi disciplina. Gracias por darme la fortaleza para continuar y la claridad para seguir creciendo cada día.

Agradezco al Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, a cada profesor que me acompañó en este proceso y aportó con su enseñanza y dedicación a mi desarrollo profesional. A mis asesores y tutoras, gracias por su guía, por su paciencia y por haber creído en mí durante este proyecto que representa una de las metas más significativas de mi vida.

Este logro es, principalmente, un reconocimiento personal, por mi constancia, perseverancia y dedicación. A lo largo de este proceso he superado obstáculos y enfrentado situaciones que pusieron a prueba mi carácter, mi paciencia y mi fortaleza. Hoy puedo mirar atrás y sentir orgullo de todo lo que he alcanzado por mí misma.

He aprendido que el equilibrio interior es la base para que todo lo demás funcione. Cuando una persona se encuentra en paz consigo misma, su entorno también se fortalece.

Finalmente agradezco a mis tres grandes amores mis hermosas hijas Madeline Joryuanna, Azury Elisheva y mi amor Miguel Angel Galindo pareja y compañero de camino, por estar presente en esta etapa, por compartir el esfuerzo, las metas y los sueños que hoy se convierten en un logro que ambos celebramos, cada uno desde su propio crecimiento.

Resumen

La presente investigación se desarrolló con la finalidad de analizar la variabilidad en el desempeño de los calentadores solares de tubos al vacío, considerando que factores como las condiciones climáticas, el estado operativo de los equipos y la falta de mantenimiento pueden influir en su rendimiento y confiabilidad.

El estudio se vinculó a una institución de educación superior ubicada en el municipio de Santiago Tianguistenco, Estado de México; sin embargo, la investigación experimental y la toma de mediciones se realizaron en instalaciones situadas dentro de la misma región geográfica, bajo condiciones climáticas equivalentes, con el fin de garantizar la representatividad de los resultados obtenidos.

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, experimental y aplicado, utilizando el ciclo Plan–Do–Check–Act (PDCA) como metodología para estructurar las etapas de medición, análisis y mejora. Se realizaron mediciones sistemáticas de temperatura y caudal durante dos semanas consecutivas en horarios estandarizados. Posteriormente, se aplicó mantenimiento preventivo a uno de los equipos con el propósito de evaluar su impacto en el desempeño del sistema. Para el análisis de los datos se emplearon herramientas de estadística descriptiva y análisis de varianza (ANOVA), con el objetivo de identificar diferencias estadísticamente significativas.

Los resultados evidenciaron que, si bien las condiciones climáticas influyen en el comportamiento térmico del sistema, el estado operativo y el mantenimiento del equipo representan el factor predominante en el rendimiento térmico y la estabilidad del caudal. Asimismo, el calentador con menor antigüedad presentó un desempeño más estable, y la aplicación de mantenimiento preventivo permitió mejorar de manera significativa el comportamiento térmico del equipo intervenido, incluso bajo condiciones ambientales variables.

Los hallazgos aportan evidencia técnica local que contribuye a la optimización de la operación y el mantenimiento de calentadores solares en regiones con alta variabilidad climática.

Palabras Clave: Calentadores solares, Rendimiento térmico, Mantenimiento preventivo, Mejora continua, Análisis estadístico, Ciclo PDCA.

Abstract

This research was conducted with the aim of analyzing the variability in the performance of evacuated tube solar water heaters, considering that factors such as climatic conditions, operational status of the equipment, and lack of maintenance may influence their performance and reliability.

The study was linked to a higher education institution located in the municipality of Santiago Tianguistenco, State of Mexico; however, the experimental research and data collection were carried out in facilities within the same geographical region, under equivalent climatic conditions, in order to ensure the representativeness of the obtained results.

The research was developed under a quantitative, experimental, and applied approach, using the Plan–Do–Check–Act (PDCA) cycle as a methodology to structure the stages of measurement, analysis, and improvement. Systematic measurements of temperature and flow rate were carried out over two consecutive weeks at standardized times. Subsequently, preventive maintenance was applied to one of the systems in order to evaluate its impact on overall performance. Data analysis was conducted using descriptive statistics and analysis of variance (ANOVA) to identify statistically significant differences.

The results showed that, although climatic conditions influence the thermal behavior of the system, the operational condition and maintenance of the equipment represent the predominant factor in thermal performance and flow stability. Likewise, the heater with lower service age exhibited more stable performance, and the application of preventive maintenance significantly improved the thermal behavior of the intervened system, even under variable environmental conditions.

The findings provide local technical evidence that contributes to optimizing the operation and maintenance of solar water heaters in regions with high climatic variability.

Keywords: Solar water heaters, Thermal performance, Preventive maintenance, Continuous improvement, Statistical análisis, PDCA cycle

Índice

Capítulo	12
I	12
1.1 Introducción	13
1.2 Problemática	15
1.3 Justificación	16
1.4 Objetivo General	18
1.5 Objetivos Específicos	18
1.6 Alcances	18
Capítulo	20
II	20
2.1 Estado de Arte	21
2.2 Rendimiento de los calentadores solares de tubos al vacío	21
2.3 Antecedentes técnicos	21
2.4 Formación y funcionamiento del calentador solar de tubos al vacío	22
2.5 Especificaciones de fábrica	22
2.6 Protocolos experimentales e instrumentación	23
2.7 Factores ambientales en el Estado de México	23
2.8 Rendimiento en temporadas nubladas y lluviosas	24
2.9 Herramientas estadísticas y estudios piloto	25
Capítulo	30
III	30
3.1 Marco Teórico	31
3.2. Energía solar térmica y su aprovechamiento	31
3.3 Calentadores solares de tubos al vacío.....	32
3.3.1 Historia y evolución tecnológica	32
3.3.2 Componentes y funcionamiento	33
3.3.3 Ventajas y limitaciones.....	34
3.4 Factores que afectan la eficiencia térmica	34

3.4.1 Radiación solar y temperatura ambiente	34
3.4.2 Orientación e inclinación.....	35
3.4.3 Antigüedad y mantenimiento	35
3.4.4 Materiales y pérdidas térmicas	35
3.4.5 Caudal y flujo térmico	35
3.4.6 Factores climáticos en el Estado de México	36
3.5. Aplicaciones y contexto de uso en México	36
3.5.1 Aprovechamiento de la energía solar térmica en México	36
3.5.2 Uso doméstico y social	36
3.5.3 Aplicaciones industriales y comerciales	37
3.5.4 Marco normativo mexicano	38
3.5.5 Potencial económico y mercado nacional	38
3.5.6 Barreras tecnológicas y climáticas	38
3.5.7 Impacto ambiental y sostenibilidad.....	39
3.6. Herramientas de mejora continua aplicadas a proyectos energéticos	39
3.6.1 La mejora continua en ingeniería industrial.....	39
3.6.2 Filosofías de mejora continua: Kaizen, Lean y Six Sigma	39
3.6.3 Justificación del uso del ciclo PDCA.....	40
3.6.4 Kaizen, Lean y Six Sigma	40
Capítulo	41
IV.....	41
4. Metodología	42
4.1 Planeación del proyecto mediante el ciclo (Plan–Do–Check–Act) PDCA	42
4.1.1 PLAN (Planeación)	42
4.1.2 DO (Implementación).....	42
4.1.3 DO–CHECK (Verificación).....	43
4.1.4 CHECK–ACT (Acción / Mejora).....	43
4.2 Descripción de los equipos.....	47
4.2.1 Calentador 1 (equipo de 6 años de antigüedad)	47

4.2.2 Calentador 2 (equipo de 5 años)	48
4.3 Relevancia metodológica de la instalación	50
4.4 Influencia de la ubicación geográfica	50
4.5 Variables del estudio	52
4.5.1 Variables dependientes	52
.....	53
4.5.2 Variables independientes	53
4.5.3 Variables de control	54
4.6. Diseño del protocolo de medición	55
4.6.1. Justificación del periodo y horarios de medición	56
4.6.2. Condiciones climáticas registradas durante las semanas de medición	56
4.7. Instrumentación utilizada	60
4.8 Registro de datos climáticos y comportamiento térmico de los equipos	66
4.8.1 Condiciones climáticas durante la Semana 1 (27 oct – 2 nov)	67
4.8.2 Condiciones climáticas durante la Semana 2 (3 – 9 nov)	70
5. Mantenimiento Preventivo	72
5.1 Justificación para realizar mantenimiento	72
5.2 Fundamentación del mantenimiento preventivo	73
5.3 Componentes a inspeccionar y piezas a reemplazar	73
5.4 Procedimiento del mantenimiento preventivo	74
5.4.1 Preparación del sistema y condiciones de seguridad	74
5.5 Relación del mantenimiento con el ciclo Ciclo de Deming (PDCA)	86
5.5.1 Seguimiento experimental después del mantenimiento preventivo	86
5.6 Condiciones climáticas “Semana 3”	86
5.6.1 Interpretación específica de la Semana 3	86
5.6.2 Temperaturas registradas en el calentador 1 durante la Semana 3	87
5.6.3 Mediciones de caudal en el calentador 1 (Semana 3)	88
5.6.4 Temperatura del agua de entrada en la Semana 3	89
5.6.5 Comparación global del calentador 1 (Semanas 1, 2 y 3)	91

Capítulo	92
V	92
5. Resultados	93
5.1 Estadística descriptiva	93
5.1.1 Temperatura de salida (out)	93
5.1.2 Promedios de Caudal.....	96
5.1.3 Diferencia de temperatura (ΔT) como indicador de desempeño térmico	98
5.2 Validación de supuestos del ANOVA.....	99
5.3 Análisis de varianza (ANOVA)	100
5.3.1 Comparación de temperatura entre calentadores (C1 vs C2)	100
5.3.2 Efecto del mantenimiento en la temperatura (C1 antes vs después)	101
5.3.3 Comparación de caudal entre calentadores (C1 vs C2).....	102
5.3.4 Efecto del mantenimiento en el caudal (C1 antes vs después)	103
5.4 Discusión de resultados	104
5.4.1 Desempeño térmico de los calentadores	104
5.4.2 Efecto del mantenimiento en el desempeño térmico	105
5.4.3 Comportamiento hidráulico del sistema (caudal).....	105
5.4.4 Relación entre condiciones ambientales y factores físicos del sistema	106
5.4.5 Interpretación estadística de los resultados (ANOVA)	106
5.4.6 Implicaciones del estudio	107
5.5 Impacto económico del mantenimiento aplicado.....	107
5.6 Impacto social	108
5.7 Impacto académico	108
Capítulo	110
VI	110
6.1 Conclusión	111
6.2 Recomendaciones técnicas.....	112
6.3 Propuestas de mejora y trabajos futuros	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen del Estado del Arte.	27
Tabla 2. Cronograma PDCA Septiembre – Diciembre 2025.	44
Tabla 3. Clasificación de las variables del estudio.	54
Tabla 4. Variables climáticas durante las semanas de medición (Octubre–Noviembre). ...	60
Tabla 5. Temperaturas registradas durante Semana 1.	68
Tabla 6. Caudal Semana 1.	69
Tabla 7. Agua de entrada (tinaco) – Semana 1.....	69
Tabla 8. Temperaturas registradas durante Semana 2.	70
Tabla 9. Mediciones de Caudal Semana 2.	71
Tabla 10. Mediciones Agua de entrada – Semana 2.	71
Tabla 11. Comparación general Semana 1 vs Semana 2.	72
Tabla 12. Componentes a inspeccionar	74
.....	76
Tabla 13. Resultado del mantenimiento preventivo (Evaluación de éxito).	83
Tabla 14. Bitácora técnica del mantenimiento preventivo (registro oficial).	84
Tabla 15. Temperaturas registradas en el calentador 1 durante la Semana 3.....	88
.....	88
Tabla 16. Mediciones de caudal del calentador 1 durante la Semana 3.	89
Tabla 17. Temperatura del agua de entrada al calentador 1 durante la Semana 3.	90
Tabla 18. Comparación global del calentador 1 antes y después del mantenimiento.....	91
Tabla 19. Diferencia de temperatura (ΔT) por horario y condición de operación.	99
Tabla 20. Estadística descriptiva del caudal antes del mantenimiento (Semanas 1–2)....	104
Tabla 21. Competencias desarrolladas	109

ÍNDICE DE FIGURAS

.....	1
Figura 1. ciclo representativo de PDCA	45
Figura 2. Ciclo PDCA aplicado al proyecto.....	46
Figura 3. Calentador solar 1 con seis años de uso.....	48
Figura 4. Calentador solar 2, con cinco años de antigüedad	49
Figura 5. Ubicación geográfica de Santiago Tianguistenco.....	51
Figura 6. Temperaturas reales en Santiago Tilapa	57
Figura 7. Temperaturas de Santiago Tilapa (3–9 noviembre 2025).	58
Figura 8. Temperatura del mes de noviembre.....	59
Figura 9. Termómetro infrarrojo para mediciones de temperatura superficial.	61
Figura 10. Recipiente graduado.	63
Figura 11: Cronometro multifuncional.....	64
Figura 12. Registro Digital	65
Figura 13. Sistema e Instalación	66
Figura 14. Preparación para el mantenimiento	75
Figura 15. Drenado parcial de termotanque	76
Figura 16: Limpieza exterior	77
Figura 17. Inspección y limpieza de los tubos al vacío	78
Figura 18. Revisión del ánodo de magnesio.	79
Figura 19. Conexiones, sellos y estructura	80
Figura 20. Puesta en servicio	81
Figura 21. Verificación posterior	82
Figura 22. Temperatura de salida por día – Semanas 1 y 2.....	93
Figura 23. Promedio de temperatura de salida por toma- semana 1 y 2	94
Figura 24. Promedio de temperatura de salida por toma- semana 1 y 2	95
Figura 25. Impacto del mantenimiento preventivo en la temperatura promedio del calentador 1.	96
Figura 26. Caudal por día- semana 1 y 2.	97

Figura 27. Impacto del mantenimiento en el caudal del Calentador 1.	98
Figura 28. Distribución de la temperatura de salida (Semanas 1–2): C1 vs C2.	100
Figura 29. Distribución de temperatura del C1 antes y después del mantenimiento.....	101
Figura 30. Distribución de caudal (C1 vs C2) en semana 1 y 2.	102
Figura 31. Distribución del caudal de C1 antes y después del mantenimiento	103

Capítulo I

1.1 Introducción

El aprovechamiento de la energía solar mediante calentadores solares de tubos al vacío representa una de las soluciones más accesibles y eficientes para la generación de agua caliente en los hogares (Duffie & Beckman, 2020). A partir de la última década, este tipo de sistemas ha ganado popularidad en México debido a su capacidad de reducir costos energéticos y su contribución a la sostenibilidad ambiental (Kalogirou, 2021). Sin embargo, estudios realizados (Olczak, 2020; Pourbafrani, 2024), han demostrado que el rendimiento real de los calentadores no siempre coincide con las especificaciones de fábrica, ya que intervienen variables críticas como la radiación solar, la temperatura ambiente, la antigüedad del equipo, la marca y el mantenimiento.

Por ejemplo, en regiones como el Estado de México, y particularmente en el municipio de Santiago Tianguistenco, las condiciones climáticas son un factor que genera un reto adicional debido a que gran parte del año se caracteriza por bajas temperaturas y una elevada presencia de nubosidad y lluvias (CONAGUA, 2023). Estos factores disminuyen significativamente los valores indicados por las marcas y el valor real, lo cual se resume en un impacto en la eficiencia de los calentadores solares, independientemente de la marca con la que se trabaje.

Es por ello que esta situación hace necesario un análisis sistemático y comparativo del funcionamiento de los calentadores en condiciones locales, para obtener datos objetivos que oriente la toma de decisiones en la operación y el mantenimiento (IEA-SHC, 2024).

Por consiguiente, el presente trabajo se centra reportar el análisis comparativo de una marca comercial de calentadores, donde se realizó una evaluación del rendimiento térmico de dos calentadores solares de tubos al vacío con diferente antigüedad (calentador 1: 6 años y calentador 2: 5 años de antigüedad). Los cuales están instalados y en funcionamiento en el municipio de Santiago Tianguistenco.

La investigación se desarrolla mediante la implementación de protocolos experimentales, los cuales incluyen la validación previa de los instrumentos de medición, la estandarización de horarios y condiciones ambientales para cada registro, la toma sistemática de datos antes y después del mantenimiento y el uso de criterios de trazabilidad para garantizar la coherencia de las lecturas. Estos protocolos se complementan con el análisis estadístico de los datos obtenidos, empleando herramientas como Microsoft Excel y la función ANOVA para identificar diferencias significativas

entre ambos equipos, todo ello bajo un enfoque de mejora continua (Evans & Lindsay, 2021). Este enfoque permite estructurar el estudio con base a la metodología del ciclo PDCA y el uso de análisis estadísticos, asegurando resultados confiables y útiles para el contexto local (Deming, 2020; Montgomery, 2021).

El impacto que se busca con el desarrollo de este proyecto se debe a la generación de futuros proyectos de mejora en los sistemas de calentamiento de calentadores solares, así como actualizar los índices de rendimiento de los equipos en una zona con alta presencia de nubosidad y lluvias. Si bien este trabajo no contempla el diseño de nuevos sistemas, los resultados podrán servir como referencia para plantear en un futuro propuestas innovadoras, como sistemas integrales de captación pluvial y almacenamiento de energía térmica adaptados a las necesidades de la región (SENER, 2022).

La relevancia de este estudio radica en generar conocimiento local y confiable que, además de fortalecer la comprensión del desempeño real de los calentadores solares en el Estado de México, sienta las bases para el desarrollo de proyectos más amplios orientados a la eficiencia energética y la mejora continua en el uso de energías renovables (Hernández-Gómez et al., 2022).

Por lo tanto, el escrito tiene la siguiente estructura de contenido:

Sección I. Con tiene las subsecciones de introducción, planteamiento del problema, objetivo general y específicos, justificación y el alcance del proyecto.

Sección II. En esta sección se desarrolla el marco teórico y el estado del arte, que integran los fundamentos técnicos y científicos sobre los calentadores solares y la eficiencia térmica.

Sección III. Expone la metodología aplicada con base en el ciclo PDCA, describiendo las etapas del proceso experimental, los instrumentos de medición y las variables de análisis.

Sección IV. Presenta los resultados obtenidos, el análisis estadístico comparativo y la discusión de hallazgos.

Sección V. Contiene las conclusiones generales, las recomendaciones y las propuestas de mejora para futuras investigaciones.

1.2 Problemática

En los últimos años, el uso de calentadores solares de tubos al vacío se ha consolidado como una alternativa sustentable para la generación de agua caliente en el sector doméstico e institucional. Sin embargo, diversos estudios (Duffie & Beckman, 2020; López-Núñez et al., 2024) han demostrado que el rendimiento real de estos sistemas difiere considerablemente de las eficiencias declaradas por los fabricantes, las cuales suelen situarse entre 80% y 85%. Dichas variaciones se atribuyen principalmente a factores técnicos como la orientación, inclinación, marca, antigüedad y mantenimiento y a factores ambientales, entre ellos la radiación solar, la temperatura ambiente y las condiciones climáticas propias de cada región (Olczak, 2020; Pourbafrani, 2024).

En el Estado de México, las condiciones meteorológicas representan un reto adicional para el aprovechamiento de la energía solar térmica. Santiago Tianguistenco, en particular, presenta un clima templado-frío, con una presencia de nubosidad superior al 60 % durante gran parte del año, especialmente en la temporada de lluvias, así como periodos de precipitación frecuentes que se concentran entre el 65 % y 70 % del total anual, lo que reduce la radiación solar directa disponible y afecta la eficiencia térmica de los equipos (CONAGUA, 2023). Además, la variabilidad climática actual, caracterizada por estaciones cada vez menos predecibles, hace necesario estudiar cómo estos cambios influyen en el comportamiento de los sistemas solares y en la estabilidad de su rendimiento a lo largo del tiempo (IEA-SHC, 2024). Esta situación no solo afecta el desempeño térmico de los calentadores solares, sino que también genera un impacto económico en los usuarios, quienes recurren al uso de gas LP o electricidad para compensar la deficiencia en la temperatura del agua.

A pesar de que en México existen diversas investigaciones (TecNM Celaya, 2024; UAZ, 2021), sobre el desempeño de calentadores solares, la mayoría se ha desarrollado en estados con condiciones de radiación más estables, como Guanajuato, Zacatecas o Sonora. Esto genera un área de oportunidad para desarrollar estudios dentro de la región central del país, donde las condiciones atmosféricas son distintas y la información sobre el desempeño real de los equipos es limitada. Esta ausencia de estudios locales en el Estado de México impide contar con parámetros de referencia confiables para evaluar la eficiencia térmica y seleccionar tecnologías adecuadas al entorno, para optimizar el rendimiento de los calentadores solares.

1.3 Justificación

En este contexto, surge la necesidad de analizar las causas que influyen en el rendimiento real de los calentadores solares en Santiago Tianguistenco, considerando tanto factores técnicos como ambientales. La presente investigación se justifica en la necesidad de comprender cómo variables como la marca, antigüedad, posición y mantenimiento de los equipos, así como la radiación solar, la temperatura ambiente y la variabilidad climática, influyen en el desempeño de los sistemas solares térmicos. Generar información científica local permitirá fortalecer la toma de decisiones técnicas y servir como base para proyectos de mejora continua orientados a la eficiencia energética (Evans & Lindsay, 2021; Montgomery, 2021).

Analizar el rendimiento real de los calentadores solares de tubos al vacío en la región resulta relevante, ya que cuando estos equipos no alcanzan la temperatura esperada, los usuarios recurren al uso de gas LP o electricidad para compensar la deficiencia térmica. Esta situación incrementa el gasto económico y reduce el impacto ambiental positivo que justifica la adopción de tecnologías solares. En este sentido, una tecnología de energía limpia que no genera un beneficio tangible pierde confiabilidad y aceptación, lo que afecta la transición energética a nivel doméstico e institucional (IEA, 2023).

El estudio adquiere relevancia al centrarse en el análisis comparativo de dos equipos reales con características similares de capacidad e instalación, operando bajo un mismo entorno climático. Este enfoque permite evaluar, desde una perspectiva técnica y metodológica, la influencia potencial de distintos factores operativos en el desempeño térmico de los calentadores solares en climas templado-fríos. La información derivada de este análisis resulta pertinente para mejorar prácticas de instalación, operación y mantenimiento, así como para orientar la selección de tecnologías más adecuadas para regiones con alta nubosidad y radiación solar variable, como la zona centro del Estado de México (CONAGUA, 2023; Olczak, 2020).

Por lo tanto, la investigación se justifica por la limitada disponibilidad de datos locales sobre el rendimiento real de calentadores solares en el Estado de México. La ausencia de información regional dificulta la evaluación objetiva de la eficiencia térmica de estos sistemas y limita el desarrollo de soluciones adaptadas a las condiciones climáticas específicas de la zona. Contar con valores de referencia reales permitirá sentar bases técnicas para futuros proyectos de

mejora continua e innovación sustentable, evitando la dependencia exclusiva de modelos comerciales desarrollados para contextos distintos (Hussain & Mohd, 2022; Pourbafrani, 2024).

Desde el punto de vista metodológico, la adopción del ciclo Plan–Do–Check–Act (PDCA) se justifica por su capacidad para estructurar el análisis del desempeño térmico como un proceso sistemático, controlado y replicable. Este enfoque permite asegurar que la evaluación no se limite a un experimento aislado, sino que se integre dentro de una lógica de mejora continua aplicable a sistemas reales (Deming, 2020; Evans & Lindsay, 2021). El uso de herramientas accesibles como Microsoft Excel se justifica por su utilidad para el manejo de datos, el análisis estadístico y la generación de información comparativa, facilitando la replicabilidad del estudio en contextos educativos y comunitarios sin requerir software especializado (Montgomery, 2021).

En este sentido, la generación de información local confiable adquiere relevancia desde los ámbitos social, económico y ambiental, al permitir orientar decisiones técnicas relacionadas con la instalación y mantenimiento basadas en evidencia técnica. Optimizar el uso de calentadores solares contribuye a reducir el consumo de energías no renovables, disminuir costos asociados al uso de energía auxiliar y fortalecer el aprovechamiento de fuentes limpias en regiones con condiciones climáticas desafiantes, donde la aplicación de metodologías de mejora continua representa una oportunidad para el desarrollo sustentable regional.

1.4 Objetivo General

Analizar el impacto de factores ambientales y operativos, que afecta el rendimiento del sistema funcional de calentadores solares mediante la metodología del ciclo de Deming (PDCA) y herramientas estadísticas (ANOVA).

1.5 Objetivos Específicos

- Realizar una revisión documental sobre calentadores solares, revisando artículos, antecedentes y estudios documentados, e identificando los materiales e instrumentos necesarios para la toma de datos.
- Evaluar el rendimiento y las características de dos marcas de calentadores solares de igual capacidad en la localidad de Santiago Tilapa, Sección XII, Estado de México.
- Evaluar y aplicar el Ciclo de Deming (PDCA) para estructurar, controlar y validar las mediciones y el análisis de datos, asegurando la consistencia y replicabilidad de los resultados.
- Medir, comparar temperatura y caudal, y aplicar pruebas estadísticas para analizar su impacto en el desempeño de los calentadores.
- Integrar y aplicar los conocimientos propios de la ingeniería industrial como la medición, el análisis estadístico, el diseño experimental y la mejora continua en un sistema real de calentamiento solar, con el fin de fortalecer mi capacidad profesional para evaluar, optimizar y proponer mejoras técnicas basadas en datos obtenidos en campo.

1.6 Alcances

La presente investigación tendrá como alcance evaluar el desempeño térmico y operativo de dos calentadores solares domésticos de igual capacidad, mediante mediciones de temperatura y caudal realizadas bajo condiciones climáticas reales, desde un enfoque aplicado de la Ingeniería Industrial. El estudio se limitará a la generación de información técnica confiable que permita comparar el comportamiento de los equipos evaluados y establecer una base objetiva para la toma de decisiones relacionadas con su operación, mantenimiento y mejora, sin considerar el diseño, rediseño o desarrollo de nuevos sistemas tecnológicos.

El alcance del trabajo se circunscribirá a la aplicación de herramientas de análisis de datos para evaluar el comportamiento del sistema, empleando estadística descriptiva y análisis de varianza (ANOVA) con el propósito de determinar la significancia de las diferencias observadas entre los equipos y entre distintas condiciones de operación. Dicho análisis se utilizará exclusivamente como soporte técnico para la evaluación del desempeño y para sustentar decisiones dentro de un enfoque de mejora continua, sin profundizar en modelos estadísticos avanzados ni en diseños experimentales complejos.

Asimismo, la investigación tendrá como alcance evaluar el mantenimiento preventivo como una estrategia dentro del proceso de mejora del desempeño de los calentadores solares, considerando su efecto en la estabilidad del rendimiento térmico y operativo. El estudio se limitará al análisis del impacto del mantenimiento a nivel operativo, sin realizar evaluaciones de vida útil, estudios de confiabilidad a largo plazo ni análisis financieros detallados.

En términos económicos, el alcance del estudio se restringirá a proporcionar información técnica que apoye la toma de decisiones orientadas al uso eficiente de los recursos disponibles, sin desarrollar análisis de costos formales. De igual forma, desde un enfoque ambiental y de sustentabilidad, la investigación se limitará a analizar el comportamiento real de los calentadores solares como alternativa de energía limpia bajo condiciones climáticas variables, sin llevar a cabo evaluaciones de impacto ambiental de gran escala.

Por lo tanto, el alcance de este trabajo se delimitará a un contexto académico e institucional, orientado a demostrar la aplicación práctica de herramientas propias de la Ingeniería Industrial, tales como análisis de procesos, mantenimiento preventivo, control básico del proceso, análisis estadístico y toma de decisiones basada en datos, para la evaluación y mejora de sistemas reales.

Capítulo

II

2.1 Estado de Arte

En la actualidad, el uso de energías renovables ya no es una opción secundaria, sino una necesidad para reducir la dependencia del gas y la electricidad (SENER, 2022; IEA, 2023). Entre estas tecnologías, los calentadores solares de tubos al vacío se han convertido en una solución accesible y eficiente para el sector doméstico en México (García-Márquez & Chacón, 2021; Hernández-Gómez et al., 2022). Como parte de la investigación, resulta fundamental comprender no solo su funcionamiento técnico, sino también los factores que condicionan su verdadero rendimiento en la práctica (Duffie & Beckman, 2020; Kalogirou, 2021). Es común que los fabricantes reporten eficiencias de hasta 85 %; sin embargo, en la operación real surgen diferencias notables debidas a la antigüedad del equipo, el clima o incluso el mantenimiento recibido (Zhou et al., 2021; Martínez et al., 2023). Por ello, este estado del arte busca integrar antecedentes técnicos, especificaciones de fábrica, protocolos de medición y análisis crítico de estudios recientes, con el fin de justificar la investigación de campo que se llevará a cabo en Santiago Tianguistenco, Estado de México (CONAGUA, 2023; Mendoza et al., 2022).

2.2 Rendimiento de los calentadores solares de tubos al vacío

La eficiencia de estos equipos ha sido estudiada de manera experimental en los últimos años. Said (2023) reporta que, bajo condiciones de radiación estándar, la eficiencia térmica promedio oscila entre 75 y 83 %, dependiendo del tipo de circulación de agua. De forma complementaria, López-Núñez et al. (2024) demostraron que factores termo hidráulicos, como el caudal y la entropía (nivel de pérdida de energía útil en el sistema), influyen directamente en la capacidad de transferencia de calor. Estos resultados confirman que el rendimiento real suele ser menor al declarado por los fabricantes, lo cual justifica la necesidad de estudios locales que contrasten datos nominales con condiciones ambientales específicas.

2.3 Antecedentes técnicos

Los primeros calentadores solares se remontan a 1891, cuando Clarence Kemp patentó el sistema Climax, considerado el primer diseño comercial (US Patent 451,384, 1891). Desde entonces, la evolución tecnológica ha transitado de colectores planos a los actuales calentadores solares de tubos al vacío en la década de 1970, alcanzando hoy un desarrollo consolidado en países como China, Alemania y México (IEA-SHC, 2024). La razón de esta evolución ha sido mejorar la

eficiencia en climas fríos o nublados, donde los colectores planos presentan pérdidas elevadas. En México, la adopción ha sido impulsada tanto por el incremento del precio del gas LP como por programas gubernamentales de fomento a las energías limpias (GIZ, 2022).

2.4 Formación y funcionamiento del calentador solar de tubos al vacío

Un calentador solar de este tipo está compuesto principalmente por:

- **Tubos de vidrio al vacío:** fabricados en borosilicato, con un recubrimiento que absorbe la radiación solar y la convierte en calor. El vacío funciona como aislante térmico, reduciendo las pérdidas de energía.
- **Base o soporte:** estructura metálica que sostiene los tubos con la inclinación adecuada.
- **Tanque térmico:** depósito aislado donde se almacena el agua caliente, generalmente protegido con espuma de poliuretano y un ánodo de magnesio que evita la corrosión.
- **Conexiones hidráulicas:** permiten la entrada de agua fría y la salida del agua caliente hacia el hogar.

El principio de operación más común es el termosifón, en el cual el agua fría entra a los tubos, se calienta con la radiación solar y, al ser menos densa, asciende al tanque de almacenamiento. Este proceso ocurre de manera continua mientras haya sol, garantizando un suministro de agua caliente sin necesidad de bombas.

2.5 Especificaciones de fábrica

Los fabricantes en México suelen reportar eficiencias térmicas de entre 80 y 85 %, con temperaturas de salida del agua de 50–60 °C bajo radiación óptima (Sunkissed, 2023; Gersamex, 2024). No obstante, estas cifras responden a ensayos en condiciones controladas. En la práctica, estudios de campo como el realizado en el TecNM Celaya (2024) mostraron que un equipo de 10 tubos rara vez alcanza esos valores cuando opera de forma continua, debido a la suciedad en los tubos o a la pérdida de vacío con el paso de los años. Esto plantea un vacío en la investigación: evaluar si el tiempo de uso y el mantenimiento explican la discrepancia entre datos de fábrica y rendimiento real.

2.6 Protocolos experimentales e instrumentación

La medición del rendimiento de los calentadores solares se rige por la norma ISO 9806:2017, que establece variables obligatorias como la irradiancia (G), temperatura de entrada y salida T (in), T (out) y caudal de agua (ISO, 2017).

Uno de los instrumentos más importantes es el piranómetro, que mide la radiación solar incidente sobre una superficie. Este dispositivo, al estar calibrado, garantiza precisión en la energía disponible para el sistema. Su uso permite calcular la eficiencia térmica real, ya que proporciona la base para comparar la energía solar recibida con la energía útil transferida al agua.

De manera complementaria, algunos estudios en México han implementado sistemas de adquisición de datos económicos utilizando plataformas como Arduino, que son microcontroladores programables capaces de registrar continuamente la temperatura y el caudal del agua (Universidad Autónoma de Zacatecas, 2021). Aunque esta tecnología no ofrece la misma precisión que los equipos de laboratorio, su bajo costo la convierte en una alternativa viable para proyectos académicos y estudios piloto.

Al comparar ambos enfoques, se observa una diferencia clara: mientras la IEA (2019) recomienda el uso de equipos de alta precisión en laboratorios especializados, investigaciones mexicanas como la de la UAZ (2021) muestran que la adaptación con instrumentos accesibles es suficiente para obtener datos confiables en condiciones reales. Esta comparación evidencia que el reto no solo es técnico, sino también económico, y que el desarrollo de metodologías adaptadas a contextos locales es parte del avance científico.

2.7 Factores ambientales en el Estado de México

El efecto de la radiación y la temperatura ambiente sobre el rendimiento de los calentadores ha sido ampliamente estudiado. Según Said (2023), las variaciones de irradiancia influyen de forma directa en la estabilidad de la eficiencia, lo que significa que en días nublados el rendimiento puede caer hasta un 30 %. En contraste, Pourbafrani (2024) plantea que el factor más determinante es el diferencial térmico (diferencia entre la temperatura del agua y la del ambiente), argumentando que las pérdidas aumentan significativamente cuando el ambiente es frío.

Al comparar estas dos perspectivas, se puede decir que ambas variables son críticas, pero en escenarios como el Estado de México, donde la radiación promedio anual es alta ($5.2 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{día}$), pero la temperatura media es relativamente baja (16°C), los dos factores se combinan: la radiación asegura disponibilidad de energía, pero la temperatura ambiente limita la retención de calor. Este análisis justifica la pertinencia de realizar mediciones locales, pues ni la teoría internacional ni los estudios en otros climas reflejan completamente la realidad de Santiago Tianguistenco.

2.8 Rendimiento en temporadas nubladas y lluviosas

Uno de los aspectos críticos para evaluar la eficiencia real de los calentadores solares de tubos evacuados es su comportamiento en temporadas con alta nubosidad o precipitaciones frecuentes, como ocurre en el Estado de México, particularmente en Santiago Tianguistenco durante los meses de verano e invierno.

La literatura muestra que, aunque el rendimiento disminuye en estas condiciones, los colectores de tubos mantienen una mejor captación bajo radiación difusa en comparación con los colectores planos. Zalamea-León et al. (2021) comprobaron que este tipo de colectores permiten reducir la necesidad de respaldo auxiliar en periodos nublados, garantizando un suministro más estable de agua caliente. En la misma línea, Olczak (2020) identificó que la productividad de los tubos es superior en escenarios de nubosidad parcial, debido a su capacidad de aislar las pérdidas térmicas y aprovechar mejor la radiación dispersa.

En un contexto más local, López-Pérez et al. (2024) analizaron sistemas de calentamiento solar en ciudades mexicanas como Toluca y mostraron que la fracción solar disminuye de manera significativa en temporadas de baja irradiancia, lo que hace necesario complementar con almacenamiento térmico o energía auxiliar. Este hallazgo coincide con lo planteado por Aggarwal et al. (2023), quienes señalan que el diseño del tanque de almacenamiento cumple un papel central para compensar las pérdidas en días nublados o lluviosos.

De manera experimental, Siuta-Olcha et al. (2020) observaron que los tubos tipo heat-pipe continúan aportando calor útil incluso con irradiancias reducidas, aunque con una caída de rendimiento que puede alcanzar el 20–30 % en comparación con un día despejado. Este dato refuerza la necesidad de realizar un estudio piloto local, que permita cuantificar estas variaciones

bajo las condiciones específicas del clima en el Estado de México, y de complementar el análisis con herramientas estadísticas como ANOVA para determinar la significancia de estas diferencias.

Por lo tanto, la evidencia disponible confirma que los calentadores solares de tubos al vacío son una alternativa más robusta frente a la nubosidad, pero también destaca la importancia de considerar el almacenamiento y el respaldo auxiliar en regiones lluviosas o con inviernos prolongados.

2.9 Herramientas estadísticas y estudios piloto

Los métodos estadísticos más empleados en la literatura incluyen análisis de varianza (ANOVA) y regresión múltiple para evaluar la influencia de variables ambientales y de diseño (Said, 2023; López-Núñez, 2024). En México, estudios piloto realizados en el TecNM (2024) han demostrado la utilidad de pruebas cortas de una o dos semanas para validar la instrumentación y ajustar la metodología experimental antes de la recolección definitiva de datos. Estos ejemplos sugieren que la investigación puede estructurarse en fases, comenzando con un piloto que garantice la confiabilidad y replicabilidad de los resultados.

El presente estado del arte muestra que, aunque los calentadores solares de tubos al vacío son una tecnología madura y ampliamente difundida, persisten vacíos de conocimiento en su desempeño real bajo condiciones locales. Los estudios internacionales confirman una discrepancia entre la eficiencia declarada y la medida, mientras que las investigaciones mexicanas demuestran la viabilidad de aplicar protocolos estandarizados adaptados a contextos específicos con instrumentación de bajo costo.

La revisión también muestra que en zonas como el Estado de México, donde las temperaturas suelen ser bajas y existe una marcada temporada de nubosidad y lluvia, los calentadores mantienen un aporte de energía aceptable, aunque con caídas de hasta un 30 % en comparación con días soleados. Aun así, se reconoce que los tubos al vacío ofrecen mejor desempeño que otros tipos de colectores bajo radiación difusa, lo que los convierte en una opción adecuada para regiones con climas como el de Santiago Tianguistenco.

Este escenario evidencia la necesidad de estudios locales que analicen no solo el efecto de la radiación y la temperatura ambiente, sino también variables técnicas como la antigüedad, la marca y el mantenimiento de los equipos. En este sentido, el presente trabajo se justifica en la

evaluación comparativa de dos calentadores en Santiago Tianguistenco, con el fin de aportar resultados útiles tanto al conocimiento académico como a la toma de decisiones prácticas en la selección y operación de estos sistemas en México.

Considerando comenzar con un estudio piloto, ya que permitirá validar la instrumentación en condiciones reales y ajustar los protocolos antes de la campaña experimental definitiva. Esta etapa es fundamental para asegurar la calidad de los datos, pues como señalan la IEA (2019) y estudios mexicanos recientes (UAZ, 2021; TecNM, 2024), los sistemas de medición adaptados a bajo costo requieren pruebas previas que garanticen su confiabilidad y reduzcan la incertidumbre de los resultados.

Posteriormente, el análisis de los datos debe apoyarse en herramientas estadísticas robustas, como el ANOVA, que permitirá determinar si las diferencias entre los calentadores evaluados son estadísticamente significativas, y la regresión múltiple, que ayudará a modelar la influencia de variables ambientales como la radiación y la temperatura ambiente sobre la eficiencia térmica. De esta manera, la investigación no solo se alinearán con metodologías internacionales, sino que también ofrecerá evidencia útil y contextualizada para el entorno local, aportando conocimiento aplicable al uso doméstico de los calentadores solares en Santiago Tianguistenco.

Tabla 1. Resumen del Estado del Arte.

Autor / Año	Título / Tema	Lugar / Contexto	Metodología	Resultados principales	Aporte a esta investigación
Kemp, C. (1891)	<i>Climax Solar Water Heater</i> (Patente US 451,384)	EE. UU.	Diseño técnico (colector plano en caja con vidrio)	Primer sistema solar comercial de calentamiento de agua.	Base histórica: origen del calentador solar y evolución hacia tubos al vacío.
ISO (2017)	<i>ISO 9806:2017 Solar thermal collectors – Test methods</i>	Norma internacional	Norma estandarizada	Define parámetros obligatorios: radiación, temperaturas de entrada/salida, caudal y eficiencia.	Base metodológica para validar el protocolo experimental de la investigación.
IEA (2019)	<i>Guide to ISO 9806</i>	Internacional	Guía práctica	Recomienda uso de piranómetros calibrados y adquisición continua de datos.	Justifica el uso de instrumentos calibrados para asegurar confiabilidad de mediciones.
Olczak, P. (2020)	<i>Comparison of solar energy gaining effectiveness...</i>	Europa (Energies, MDPI)	Comparación experimental	Los tubos evacuados presentan mayor productividad en climas mixtos.	Relevante para analizar eficiencia en condiciones variables del Estado de México.
Siuta-Oлча, A. et al. (2020)	<i>Experimental studies of thermal performance...</i>	Europa (Renewable Energy)	Pruebas experimentales bajo irradiancia variable	El rendimiento disminuye 20–30 % en días nublados.	Permite estimar la caída de eficiencia esperada en temporada lluviosa.

Tabla 1. Resumen del Estado del Arte.

Autor / Año	Título / Tema	Lugar / Contexto	Metodología	Resultados principales	Aporte a esta investigación
UAZ (2021)	<i>Evaluación de eficiencia con Arduino Mega</i>	México – Zacatecas	Sistema experimental de bajo costo	Instrumentación confiable mediante microcontroladores.	Modelo viable para instrumentación accesible en esta investigación.
Zalamea-León, A. et al. (2021)	<i>Residential solar thermal performance...</i>	MDPI – Internacional	Estudio experimental y modelado	Mejor desempeño de tubos evacuados bajo radiación difusa.	Justifica la elección de tubos al vacío en zonas con alta nubosidad.
Global Solar Atlas / SMN (2023)	Datos de radiación y temperatura	Santiago Tianguistenco, Edo. Méx.	Datos satelitales y de estación	Radiación promedio 5.2 kWh/m ² ·día; temperatura media anual 16 °C.	Justifica las condiciones locales como variable crítica del estudio.
Aggarwal, R. et al. (2023)	<i>Review on techniques for enhancing...</i>	Internacional	Revisión bibliográfica	El tanque de almacenamiento es clave para compensar pérdidas térmicas.	Refuerza la importancia del diseño del tanque en el análisis comparativo.
Said, S. (2023)	<i>Experimental Comparison of Evacuated Tube Collectors</i>	MDPI – Internacional	Pruebas experimentales comparativas	Eficiencia real entre 75–83 %.	Confirma que la eficiencia real es menor a la declarada por fabricantes.
IEA-SHC (2024)	<i>Solar Heat Worldwide 2024</i>	Global	Reporte técnico	Los tubos al vacío dominan el mercado; eficiencia declarada hasta 85 %.	Evidencia de adopción global y evolución tecnológica.

Tabla 1. Resumen del Estado del Arte.

Autor / Año	Título / Tema	Lugar / Contexto	Metodología	Resultados principales	Aporte a esta investigación
López-Núñez, O. A. et al. (2024)	<i>Assessment of thermohydraulic performance...</i>	México – PMC	Estudio experimental	El caudal y la entropía influyen en la eficiencia térmica.	Apoya el análisis técnico del rendimiento real.
Pourbafrani, M. (2024)	<i>Improving the Energy Performance...</i>	Internacional	Experimento controlado	El diferencial térmico agua-ambiente incrementa pérdidas.	Relevante para climas templado-fríos como el Estado de México.
TecNM Celaya (2024)	<i>Evaluación de un sistema solar de tubos al vacío</i>	México – Guanajuato	Estudio de campo	Eficiencia menor a la declarada; pérdidas por suciedad y antigüedad.	Referencia local comparable con el caso de Santiago Tianguistenco.
López-Pérez, L. et al. (2024)	<i>Solar water heating system with absorption heat transformer</i>	México (incluye Toluca)	Simulación y análisis de fracción solar	La fracción solar disminuye en invierno y temporada lluviosa.	Evidencia directa aplicable al contexto regional del estudio.

Fuente: Elaboración propia 2025.

Capítulo

III

3.1 Marco Teórico

A continuación, se presenta los fundamentos conceptuales que sustentan la presente investigación, integrando los principales enfoques y antecedentes relacionados con el uso de calentadores solares, la mejora continua y el análisis del desempeño de sistemas energéticos. Esta sección permite contextualizar el estudio dentro del estado del conocimiento actual y sustentar la selección de las herramientas metodológicas empleadas desde la perspectiva de la Ingeniería Industrial.

3.2. Energía solar térmica y su aprovechamiento

La energía solar térmica es una forma de conversión energética que transforma la radiación solar en calor aprovechable. Este principio se fundamenta en la ley de conservación de la energía, donde la radiación incidente sobre una superficie absorbente se convierte en energía térmica mediante transferencia por radiación, conducción y convección (Duffie & Beckman, 2020).

El flujo solar que llega a la atmósfera terrestre es de aproximadamente $1,366 \text{ W/m}^2$, conocido como constante solar, aunque este valor se reduce al atravesar las capas atmosféricas debido a procesos de absorción, reflexión y dispersión, resultando en una radiación global efectiva de entre 700 y $1,000 \text{ W/m}^2$ a nivel terrestre (Kalogirou, 2021).

El proceso de captación térmica inicia cuando la radiación solar incide sobre una superficie colectora dotada de un recubrimiento absorbente. Este material convierte la radiación en calor, el cual es transferido a un fluido, generalmente agua, mediante intercambio térmico. Este fluido, al elevar su temperatura, se emplea para usos domésticos o industriales, como calefacción, secado o generación de vapor (Hernández-Gómez et al., 2022).

El comportamiento térmico del sistema depende de varios factores:

- **Radiación solar disponible.**
- **Condiciones atmosféricas** (nubosidad, humedad, altitud),
- **Orientación e inclinación del colector.**
- **Materiales y recubrimientos empleados.**
- **Pérdidas térmicas globales** del sistema.

La eficiencia térmica (η) se define como la razón entre la energía útil obtenida y la energía solar incidente sobre el área colectora:

$$\eta = \frac{\dot{m}C_p(T_{out} - T_{in})}{A_c G}$$

donde:

$\dot{m}$ = flujo másico del fluido (kg/s),

C_p = capacidad calorífica (J/kg·°C),

T_{out} y T_{in} = temperaturas de salida y entrada (°C),

A_c = área colectora (m²),

G = radiación solar incidente (W/m²).

El valor de η depende del equilibrio entre energía absorbida y pérdidas térmicas. Cuanto más eficiente sea el aislamiento y el recubrimiento selectivo, mayor será la capacidad del sistema para retener calor.

En México, el potencial solar térmico es de los más altos de América Latina, con valores promedio de 4.5 a 6.3 kWh/m²/día (SENER, 2022). Esto representa una oportunidad significativa para reducir el consumo de gas LP y avanzar hacia la independencia energética. Sin embargo, la variabilidad climática del país, especialmente en regiones con altitud elevada como el Estado de México, exige una evaluación local del desempeño real de los sistemas (García-Márquez & Chacón, 2021).

3.3 Calentadores solares de tubos al vacío

Los calentadores solares de tubos al vacío constituyen una de las tecnologías más avanzadas dentro de los sistemas solares térmicos de baja temperatura. Su principio de funcionamiento se basa en minimizar las pérdidas de calor por convección y conducción, logrando un mayor aprovechamiento de la radiación incluso en condiciones de nubosidad o baja temperatura ambiente (Kalogirou, 2021).

3.3.1 Historia y evolución tecnológica

Los primeros colectores planos surgieron en el siglo XIX, pero su eficiencia era limitada debido a las pérdidas de calor al ambiente. En la década de 1970, Alemania y China desarrollaron

los primeros colectores de tubos al vacío, los cuales incorporaron una cámara aislante de presión reducida entre dos capas concéntricas de vidrio (Zhou et al., 2021). Este vacío actúa como una barrera térmica que impide la transferencia de calor por convección, incrementando la eficiencia en aproximadamente un 30 % respecto a los colectores planos (Duffie & Beckman, 2020).

3.3.2 Componentes y funcionamiento

El sistema está integrado por tres secciones principales:

1. **Tubos colectores:** fabricados en vidrio borosilicato de doble capa con recubrimiento selectivo (óxidos metálicos) que absorben radiación solar y minimizan pérdidas por emisión.
2. **Tanque de almacenamiento:** generalmente de acero inoxidable, con aislamiento térmico de poliuretano expandido.
3. **Estructura de soporte e hidráulica:** permite la orientación óptima y la circulación de agua por efecto **termosifón**, sin necesidad de bombas (Hernández-Gómez et al., 2022).

Durante el funcionamiento, el agua fría desciende al punto más bajo del sistema, mientras que el agua caliente asciende hacia el tanque debido a la diferencia de densidades generada por el calentamiento solar. Este proceso de convección natural asegura la renovación continua del fluido y la eficiencia térmica del sistema.

La ecuación general de eficiencia de un colector solar, considerando pérdidas térmicas globales, se expresa como:

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{G}$$

donde:

F_R = factor de remoción del colector,

$\tau\alpha$ = producto de transmisión y absorción del material,

U_L = coeficiente global de pérdidas térmicas,

T_i = temperatura de entrada del fluido,

T_a = temperatura ambiente.

Este modelo permite analizar la influencia del aislamiento, la calidad del vacío y la radiación solar sobre el desempeño térmico (Duffie & Beckman, 2020).

3.3.3 Ventajas y limitaciones

Ventajas:

- Alta eficiencia térmica incluso en climas fríos o nublados.
- Bajo mantenimiento y operación por termosifón.
- Mayor durabilidad de los materiales absorbentes.

Limitaciones:

- Fragilidad del vidrio y pérdida de vacío con el tiempo.
- Necesidad de orientación e inclinación precisa.
- Reducción de rendimiento por suciedad o sombras parciales (Martínez et al., 2023).

En regiones templadas como el Estado de México, estos equipos ofrecen ventajas significativas frente a los sistemas planos, pero requieren mantenimiento preventivo y una correcta instalación para garantizar su vida útil.

3.4 Factores que afectan la eficiencia térmica

La eficiencia de los calentadores solares depende de un equilibrio entre energía absorbida y energía perdida. Esta relación puede verse alterada por condiciones ambientales, técnicas y operativas (Duffie & Beckman, 2020).

3.4.1 Radiación solar y temperatura ambiente

La radiación solar es el insumo principal del sistema. En Santiago Tianguistenco, la radiación promedio es de 4.8 kWh/m²/día, pero puede reducirse hasta un 30 % en temporada de lluvias (CONAGUA, 2023). La temperatura ambiente afecta las pérdidas térmicas: a menor temperatura exterior, mayor diferencia de gradiente térmico y por tanto, mayor pérdida de calor hacia el entorno (García-Márquez & Chacón, 2021). Por ello, los materiales y el aislamiento juegan un papel clave en mantener el calor absorbido dentro del sistema.

3.4.2 Orientación e inclinación

De acuerdo con la norma ISO 9806:2017, la orientación ideal para México es hacia el sur geográfico, con una inclinación equivalente a la latitud del lugar $\pm 10^\circ$ (ISO, 2017). Un error de 15° puede reducir la eficiencia en más de un 12 % (Hernández-Gómez et al., 2022). Además, el sombreado parcial de árboles o edificios puede disminuir la temperatura del agua en más de 5°C .

3.4.3 Antigüedad y mantenimiento

La vida útil promedio de un calentador solar de tubos al vacío es de 10 a 15 años. Sin embargo, estudios muestran que después de cinco años, la eficiencia puede disminuir hasta un 20 % por degradación del recubrimiento y pérdida parcial del vacío (Zhou et al., 2021). El mantenimiento preventivo, que incluye limpieza de tubos, verificación de sellos y control del nivel de agua, puede recuperar entre 5 y 8 % de la eficiencia perdida (Martínez et al., 2023).

3.4.4 Materiales y pérdidas térmicas

El rendimiento global depende del coeficiente de pérdida térmica global (U_L), que cuantifica la energía disipada por conducción, convección y radiación. Materiales con recubrimientos selectivos de óxidos metálicos (Al_2O_3 , TiO_2) y aislamiento con poliuretano de alta densidad reducen el U_L y mejoran el rendimiento. Un mal aislamiento puede incrementar las pérdidas nocturnas en más del 25 % (Kalogirou, 2021).

3.4.5 Caudal y flujo térmico

El flujo másico del agua ($\dot{m}$) determina el intercambio térmico. Un caudal bajo provoca sobrecalentamiento y evaporación, mientras que un caudal alto disminuye el tiempo de contacto térmico. El flujo óptimo se determina experimentalmente mediante el equilibrio entre el calentamiento útil y la pérdida por convección interna (Hernández-Gómez et al., 2022).

3.4.6 Factores climáticos en el Estado de México

La altitud superior a 2,600 m s.n.m. implica una mayor radiación UV, pero también temperaturas bajas y nubosidad frecuente. Estos factores reducen la radiación directa y aumentan la dispersa, lo que justifica realizar mediciones empíricas locales para validar los valores de eficiencia. Los sistemas de tubos al vacío son los más adecuados en estas condiciones debido a su resistencia térmica y tolerancia a la radiación difusa (SENER, 2022).

3.5. Aplicaciones y contexto de uso en México

3.5.1 Aprovechamiento de la energía solar térmica en México

El aprovechamiento de la energía solar térmica en México ha tomado gran relevancia durante las dos últimas décadas, impulsado por la combinación de factores económicos, ambientales y de política pública. México se encuentra en una posición geográfica privilegiada, con un promedio de radiación global diaria que varía entre 4.5 y 6.5 kWh/m²/día, ubicándose entre los países con mayor potencial solar del continente americano (SENER, 2022).

A pesar de este potencial, el aprovechamiento real depende de las condiciones climáticas regionales, el tipo de tecnología instalada, la calidad del mantenimiento y el grado de capacitación de los usuarios. Regiones como el Estado de México, debido a su altitud y clima templado-húmedo, presentan una radiación ligeramente inferior al promedio nacional, lo que exige el uso de tecnologías más eficientes como los calentadores solares de tubos al vacío (García-Márquez & Chacón, 2021).

Diversos estudios realizados por el Instituto de Energías Renovables (IER) y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) han demostrado que el uso de calentadores solares en zonas semiurbanas puede reducir hasta un 70 % del consumo anual de gas LP, representando ahorros directos en la economía familiar y una disminución significativa de emisiones contaminantes (Mendoza et al., 2022).

3.5.2 Uso doméstico y social

Los calentadores solares se han consolidado como una alternativa sostenible para la generación de agua caliente sanitaria en el sector residencial mexicano. Su adopción está

estrechamente ligada al incremento de los precios del gas LP, que continúa siendo la fuente energética predominante en los hogares del país (INEGI, 2023).

De acuerdo con datos de la Secretaría de Energía, un calentador solar promedio puede generar un ahorro energético equivalente al 60% del consumo total de gas doméstico, dependiendo de la radiación disponible y del tamaño del sistema (SENER, 2022). Este ahorro no solo tiene impacto económico, sino también ambiental, ya que reduce las emisiones de CO₂ y promueve una cultura de consumo energético responsable.

En comunidades rurales o de bajos ingresos, el acceso a energía térmica mediante sistemas solares representa una mejora directa en la calidad de vida, al eliminar el gasto constante en combustibles fósiles y reducir los riesgos asociados a fugas o explosiones de gas (Martínez et al., 2023). Por ello, programas como el Programa de Sustentabilidad Energética Residencial (PSER) han fomentado la instalación de calentadores solares en zonas de alta marginación, contribuyendo a la equidad energética.

3.5.3 Aplicaciones industriales y comerciales

En el ámbito industrial, los sistemas solares térmicos se emplean principalmente en lavanderías, hoteles, restaurantes y pequeñas industrias alimentarias, donde se requiere agua caliente constante. Los calentadores de tubos al vacío pueden alcanzar temperaturas de hasta 95 °C, lo que los hace idóneos para procesos como esterilización, lavado y secado (Kalogirou, 2021).

La Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), a través del Instituto de Energías Renovables (IER), ha implementado proyectos híbridos que combinan la energía solar con sistemas eléctricos o de gas para garantizar la continuidad del suministro, logrando reducciones del 25–35 % en los costos operativos de las instalaciones (Hernández-Gómez et al., 2022).

Por su parte, el sector comercial ha encontrado en esta tecnología una oportunidad para mejorar su competitividad y cumplir con políticas ambientales. Hoteles, gimnasios y centros recreativos han adoptado sistemas solares para cumplir con normativas de eficiencia energética, como la NOM-027-ENER/SCFI-2018, que establece los estándares de rendimiento térmico para los calentadores solares comercializados en México (DOF, 2018).

3.5.4 Marco normativo mexicano

El marco regulatorio mexicano busca garantizar la seguridad, calidad y eficiencia de los equipos solares térmicos. La NOM-027-ENER/SCFI-2018 establece los métodos de prueba, requisitos de etiquetado y parámetros de eficiencia mínima para calentadores solares domésticos y comerciales. Además, esta norma se alinea con la ISO 9806:2017, la cual define los procedimientos experimentales para medir la eficiencia y pérdidas térmicas de los colectores solares (ISO, 2017).

Estas regulaciones aseguran la comparabilidad de resultados y fomentan la confiabilidad del mercado nacional, lo que resulta esencial para investigaciones experimentales como la presente, que buscan evaluar el rendimiento real de los equipos bajo condiciones locales del Estado de México.

3.5.5 Potencial económico y mercado nacional

México se ubica entre los 15 países con mayor crecimiento en el mercado de calentadores solares a nivel mundial (IEA, 2023). El 85 % de las instalaciones corresponden al sector residencial, con un crecimiento promedio del 10 % anual en la última década (SENER, 2022).

El retorno de inversión (ROI) de un sistema doméstico de 10 tubos suele alcanzarse entre 2 y 3 años, considerando el ahorro mensual en consumo de gas LP y una vida útil de 10 a 15 años (INEGI, 2023). Esta alta rentabilidad ha impulsado la expansión de la industria nacional de manufactura de colectores y tanques, fortaleciendo la cadena de valor del sector energético sustentable.

3.5.6 Barreras tecnológicas y climáticas

A pesar de sus beneficios, existen limitaciones en la adopción masiva de esta tecnología:

- **Errores de instalación** (mala orientación, inclinación o sellado),
- **Falta de mantenimiento preventivo,**
- **Desconocimiento del usuario** sobre operación y limpieza, y
- **Pérdida parcial de vacío** con el paso del tiempo (Hernández-Gómez et al., 2022).

Adicionalmente, la variabilidad climática del país genera rendimientos dispares. En regiones con alta nubosidad o lluvias frecuentes como el Estado de México, la eficiencia puede reducirse hasta un 30 % en invierno, lo que evidencia la necesidad de estudios de campo para determinar el comportamiento real de los equipos (García-Márquez & Chacón, 2021).

3.5.7 Impacto ambiental y sostenibilidad

Cada calentador solar doméstico puede evitar la emisión anual de 1.5 toneladas de CO₂, equivalente a plantar 25 árboles o dejar de consumir 600 kg de gas LP (SENER, 2022). Este impacto positivo se alinea con los objetivos del Acuerdo de París y la Estrategia Nacional de Energía 2022–2030, que establecen el compromiso de aumentar al 35 % la participación de energías limpias en la matriz nacional.

El desarrollo de investigaciones locales, como la presente, fortalece los esfuerzos hacia una transición energética sostenible, basada en evidencia científica y mejora continua.

3.6. Herramientas de mejora continua aplicadas a proyectos energéticos

3.6.1 La mejora continua en ingeniería industrial

La mejora continua es un principio esencial de la ingeniería industrial moderna, orientado a la optimización constante de los procesos a través de la evaluación sistemática de resultados y la implementación de acciones correctivas (Evans & Lindsay, 2021). En proyectos energéticos, esta filosofía se aplica al monitoreo, medición y validación del rendimiento de los sistemas, asegurando la fiabilidad de los datos y la reproducibilidad científica.

Inspirada en autores como Deming, Ishikawa e Imai, la mejora continua promueve la idea de que la excelencia técnica se logra mediante pequeñas mejoras sostenidas y verificables, más que a través de grandes cambios esporádicos (Imai, 2021).

3.6.2 Filosofías de mejora continua: Kaizen, Lean y Six Sigma

- **Kaizen:** enfoca la mejora gradual a través de la participación activa del personal y el compromiso con el cambio cultural. Promueve la eliminación de desperdicios y la estandarización de buenas prácticas (Imai, 2021).

- **Lean Manufacturing:** se centra en eliminar actividades que no agregan valor (muda), optimizando tiempos, recursos y flujos de trabajo (Womack & Jones, 2020).
- **Six Sigma:** utiliza herramientas estadísticas para reducir la variabilidad de los procesos, principalmente en entornos industriales o productivos (Montgomery, 2021).

Aunque estas metodologías son efectivas, su aplicación requiere estructuras organizacionales complejas y grandes volúmenes de datos, por lo que no son completamente compatibles con investigaciones experimentales pequeñas.

3.6.3 Justificación del uso del ciclo PDCA

El ciclo PDCA (Plan–Do–Check–Act), propuesto por Deming y Shewhart, es una herramienta metodológica sencilla y adaptable a contextos de investigación. Su estructura secuencial permite organizar las actividades experimentales bajo cuatro fases:

1. **Plan (Planificar):** definir objetivos, variables y metodología experimental.
2. **Do (Hacer):** ejecutar las pruebas y registrar los datos.
3. **Check (Verificar):** analizar resultados y contrastarlos con la teoría.
4. **Act (Actuar):** aplicar mejoras, recomendaciones o ajustes para futuras fases (Deming, 2020).

El PDCA (Plan–Do–Check–Act), es especialmente útil en proyectos de ingeniería aplicada, ya que combina rigor metodológico con flexibilidad operativa, permitiendo adaptarse a cambios en las condiciones experimentales o de entorno.

3.6.4 Kaizen, Lean y Six Sigma

Aunque las tres metodologías comparten el principio de mejora continua, su naturaleza las hace más apropiadas para procesos industriales de gran escala.

- **Kaizen** requiere la participación colectiva de personal y jerarquías organizacionales.
- **Lean** se enfoca en optimización de flujos productivos repetitivos.
- **Six Sigma** demanda análisis estadísticos de gran volumen y control de procesos industriales (Montgomery, 2021).

Capítulo

IV

4. Metodología

4.1 Planeación del proyecto mediante el ciclo (Plan–Do–Check–Act) PDCA

En el presente proyecto se aplicó la metodología PDCA (Plan–Do–Check–Act) propuesta por Deming, como una herramienta de mejora continua que permite planificar, ejecutar, verificar y actuar sobre los resultados obtenidos. Este enfoque garantiza un control sistemático del proceso experimental, asegurando la validez y la trazabilidad de los datos recolectados.

4.1.1 PLAN (Planeación)

Durante el mes de septiembre se llevó a cabo la fase de planeación, la cual incluyó la revisión bibliográfica (Estado del Arte) y la definición del marco metodológico. En esta etapa se identificaron los antecedentes técnicos, los factores ambientales críticos del Estado de México y las metodologías internacionales (ISO 9806). Asimismo, se estableció el protocolo experimental considerando la instrumentación disponible (termómetro infrarrojo, recipiente volumétrico y cronómetro digital), así como la necesidad de realizar un estudio piloto para validar la confiabilidad de los registros.

En este mismo mes se documentó la antigüedad de los equipos: un calentador de 6 años de uso y otro de 5 años, ambos de tubos al vacío, así como sus marcas, estado físico y condiciones de instalación. Esta información de base será fundamental para interpretar diferencias de rendimiento atribuibles a la antigüedad del equipo o al fabricante.

4.1.2 DO (Implementación)

La fase de implementación se desarrolló en octubre. En este periodo se realizaron las primeras corridas de medición bajo las condiciones climáticas propias del mes, que en Santiago Tianguistenco se caracterizan por temperaturas frescas y transición de temporada de lluvias a un clima más seco, lo cual ofrece un escenario idóneo para registrar variaciones en la radiación solar.

Las actividades principales incluyen:

- Configuración y calibración del sistema de adquisición de datos.

- Registro continuo de variables: temperatura de entrada y salida del agua, y caudal.
- Obtención de datos en días soleados, parcialmente nublados y lluviosos.
- Documentación del estado físico de los equipos y su limpieza inicial.

En esta etapa se busca validar el protocolo experimental en condiciones reales y generar una primera base de datos.

4.1.3 DO–CHECK (Verificación)

Durante noviembre se realizó recolección de datos y se realizó un análisis preliminar de la información obtenida. Este análisis permitió identificar patrones iniciales de eficiencia, y diferencias entre ambos calentadores.

Las acciones principales son:

- Contraste de los resultados obtenidos con las especificaciones de fábrica y con valores reportados en la literatura.
- Uso de pruebas estadísticas iniciales (ANOVA exploratorio) para determinar si existen diferencias significativas entre los dos equipos.

Esta etapa sirvió para detectar posibles errores de registro, inconsistencias en los datos o la necesidad de ajustar los protocolos antes del análisis final.

4.1.4 CHECK–ACT (Acción / Mejora)

En diciembre se llevó a cabo la fase de cierre y mejora continua. Aquí se consolidaron los datos de toda la campaña experimental y se aplicaron las herramientas estadísticas robustas: ANOVA completo, con el fin de determinar la influencia simultánea de temperatura ambiente, antigüedad y marca en el rendimiento de los equipos.

Las actividades clave incluyen:

- Análisis estadístico integral de los datos recopilados.

- Elaboración de comparativos gráficos de rendimiento bajo diferentes condiciones climáticas.
- Evaluación de la fiabilidad de la instrumentación y recomendaciones para futuros estudios.
- Redacción de conclusiones y propuestas de mejora en mantenimiento preventivo, instalación y selección de equipos.

El producto final de esta fase fue un reporte con evidencia experimental local y contextualizada, que permitió fundamentar decisiones técnicas y contribuir al conocimiento académico sobre el rendimiento real de los calentadores solares de tubos al vacío en regiones con alta nubosidad como el Estado de México.

En la Tabla 2 se presenta el cronograma de actividades desarrollado bajo el esquema PDCA, correspondiente al periodo de septiembre a diciembre de 2025, y en la Figura 1 se muestra el diagrama cíclico que representa su aplicación en la investigación.

Tabla 2. Cronograma PDCA Septiembre – Diciembre 2025.

Mes	Fase PDCA	Actividades principales
Septiembre	PLAN	Revisión bibliográfica, definición de objetivos, protocolos y variables. Registro de antigüedad, marca e instalación de equipos.
Octubre	DO	Inicio de mediciones experimentales. Configuración de instrumentación. Registro continuo de radiación, temperatura y caudal.
Noviembre	DO– CHECK	Recolección continua de datos. Análisis preliminar de eficiencia y diferencias entre calentadores. Ajustes metodológicos.
Diciembre	CHECK– ACT	Análisis estadístico completo (ANOVA, regresión). Conclusiones finales. Elaboración de recomendaciones y entrega de reporte.

Fuente: Elaboración propia 2025.

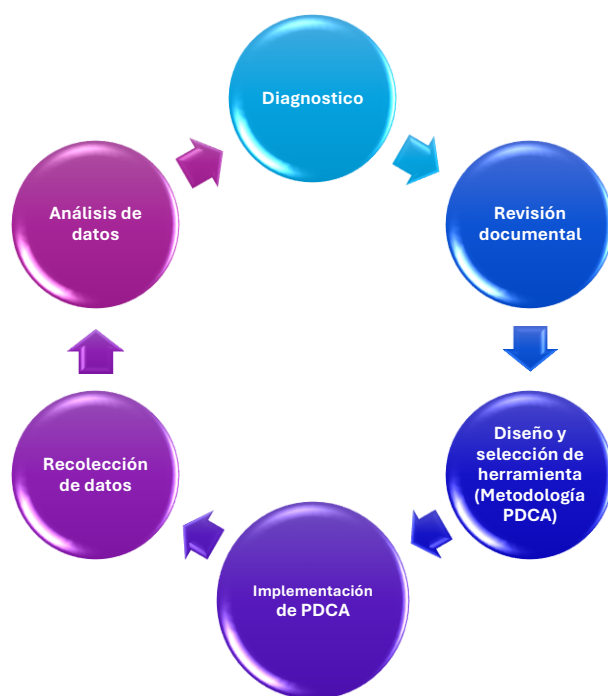


Figura 1. ciclo representativo de PDCA



Figura 2. Ciclo PDCA aplicado al proyecto.

4.2 Descripción de los equipos

4.2.1 Calentador 1 (equipo de 6 años de antigüedad)

El primer calentador corresponde a un equipo con aproximadamente seis años de uso continuo, instalado bajo condiciones reales de operación. Se trata de un modelo de gama económica, tal como se muestra en la Figura 3, cuyos rangos de eficiencia térmica reportada suelen oscilar entre 70–78% en condiciones estándar (SENER, 2022).

Durante la inspección visual se observó lo siguiente:

- Tubos al vacío con desgaste por antigüedad.
- Aislamiento del termotanque con indicios de deterioro.
- Inclinación aproximada de 30–35°, ligeramente inferior a la recomendada para la latitud del Estado de México ($\approx 23^\circ + 10^\circ$ adicionales según ISO 9806:2017).
- Altura del sistema: entre 1.10 y 1.20 metros sobre el piso de azotea.
- Manguera de retorno hacia el tinaco, utilizada como indicador de llenado.

Estas condiciones pueden explicar por qué este equipo presenta menor temperatura de salida en las mediciones preliminares, especialmente entre la primera y la tercera toma del día, donde se reporta agua caliente más limitada.



Figura 3. Calentador solar 1 con seis años de uso.

4.2.2 Calentador 2 (equipo de 5 años)

El segundo calentador es un equipo con cinco años de antigüedad, con termotanque de acero inoxidable, tal como se muestra en la Figura 4. Este modelo cuenta con un termotanque de 150 L y 10 tubos al vacío, diseñado para operar mediante termosifón y brindar un desempeño estable en climas templados y fríos.

A diferencia del primer equipo, el calentador 2 presenta características que favorecen una mayor eficiencia térmica, entre ellas:

- mejor aislamiento térmico del termotanque,
- materiales anticorrosivos y de mayor durabilidad,
- recubrimiento selectivo de alta absorción en los tubos,

- mayor capacidad de retención de calor durante la tarde y noche.

Durante la inspección visual se identificaron:

- Tubos en buen estado, sin pérdida visible de vacío.
- Base estable, nivelada y con fijación adecuada.
- Inclinación cercana a la recomendada para la latitud local.
- Sistema termosifón funcionando sin obstrucciones.

Este calentador ha mostrado mayores temperaturas de salida, conservando agua caliente hasta después de la medianoche, lo que sugiere una mejor capacidad de conservación térmica en comparación con el equipo de seis años.



Figura 4. Calentador solar 2, con cinco años de antigüedad.

4.3 Relevancia metodológica de la instalación

La instalación paralela y en condiciones prácticamente idénticas permite que ambos equipos sean analizados bajo un diseño experimental de comparación directa, donde las variables independientes son:

- antigüedad
- estado físico
- mantenimiento previo

Mientras que las variables de control incluyen:

- orientación
- inclinación
- altitud

Este control metodológico es fundamental para garantizar que los resultados de temperatura de salida (T_{out}) sean válidos y comparables entre ambos sistemas (Duffie & Beckman, 2020; ISO 9806:2017).

4.4 Influencia de la ubicación geográfica

La ubicación geográfica de los calentadores solares constituye un factor determinante en su desempeño térmico, En el caso de esta investigación, ambos equipos se encuentran instalados en Santiago Tianguistenco, Estado de México, una región caracterizada por su altitud elevada, clima templado - húmedo y presencia frecuente de nubosidad, tal como se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Ubicación geográfica de Santiago Tianguistenco.

De acuerdo con el Atlas Nacional de Riesgos y los datos del Servicio Meteorológico Nacional, Santiago Tianguistenco se localiza a una altitud aproximada de 2,600 a 2,720 m s.n.m., condición que provoca temperaturas ambientales más bajas y un gradiente térmico mayor entre el agua caliente y el exterior (CENAPRED, 2025; CONAGUA, 2023).

Asimismo, la región presenta un clima de tipo templado subhúmedo, con una temporada prolongada de lluvias entre junio y octubre, y una nubosidad significativa durante gran parte del año. Esta condición limita la radiación directa incidente, obligando al sistema a operar mayormente con radiación difusa, la cual posee un menor contenido energético (SENER, 2022). Como resultado, los calentadores pueden mostrar diferencias notorias entre su rendimiento teórico y su desempeño real.

La orientación geográfica también es relevante. Ambos calentadores se encuentran instalados en la misma dirección, con altitud de dos niveles y ubicadas en zona de ladera, lo cual

favorece una captación relativamente uniforme al no existir sombras relevantes durante el trayecto solar diario. Sin embargo, la inclinación natural del terreno y las variaciones de altitud pueden modificar ligeramente el ángulo óptimo de captación ya que la ISO 9806:2017 recomienda orientar e inclinar los colectores solares de forma que se maximice la radiación solar incidente (ISO, 2017).

Considerando estos factores geográficos y climáticos, es indispensable contextualizar los resultados experimentales dentro de las condiciones reales del entorno, ya que el rendimiento de los sistemas solares térmicos en Santiago Tianguistenco no puede compararse directamente con regiones de menor altitud o mayor radiación anual.

El presente capítulo describe el procedimiento metodológico aplicado para evaluar el rendimiento térmico de dos calentadores solares de tubos al vacío. La metodología se diseñó con un enfoque práctico, ordenado y replicable, tomando en cuenta las condiciones reales de operación, las limitaciones técnicas del proyecto y la necesidad de obtener datos confiables para el análisis comparativo entre ambos equipos.

4.5 Variables del estudio

El análisis del rendimiento térmico de ambos calentadores solares requiere identificar claramente las variables que intervienen en el proceso. Para esta investigación se trabajó con tres tipos de variables: dependientes, independientes y de control, seleccionadas con base en la naturaleza del fenómeno térmico y en los protocolos internacionales de evaluación de colectores solares (ISO 9806:2017; Duffie & Beckman, 2020).

4.5.1 Variables dependientes

Las variables dependientes representan los resultados que se desea medir y analizar; es decir, son los indicadores directos del desempeño térmico de cada calentador. En este estudio se evaluaron las siguientes:

a) Temperatura de salida del agua T (out)

Es el principal indicador del rendimiento instantáneo del sistema. Su medición se realizó en tres horarios del día (8:00–10:00 h, 13:00–15:00 h y 17:00–19:00 h), seleccionados debido a que:

- En mediciones preliminares, el Calentador 1 mostró variaciones térmicas importantes entre la mañana, la tarde y el atardecer.
- Se observó que el Calentador 2 mantenía agua caliente incluso después de la medianoche.
- Estos horarios permiten capturar los momentos de mayor variabilidad climática y de radiación difusa en la región.

b) Temperatura de entrada del agua T(in)

Permite determinar el salto térmico $\Delta T = T(\text{out}) - T(\text{in})$, el cual se utiliza para evaluar la eficiencia térmica del equipo.

c) Caudal (Q)

Indica el flujo de agua caliente del sistema. Se calcula con el volumen y el tiempo de llenado:

$$Q = \frac{V}{t}$$

c) Salto térmico (ΔT) calculada.

Se obtiene de la diferencia entre entrada y salida, por eso es calculado:

$$\Delta T = T_{out} - T_{in}$$

4.5.2 Variables independientes

Son aquellas que pueden influir en el rendimiento y cuya comparación constituye el eje central del estudio:

- Marca del equipo (marca 1 vs. Marca 2).
- Antigüedad (6 años vs. 5 años).
- Estado físico de los tubos y del aislamiento.
- Mantenimiento previo recibido.

Estas variables permiten analizar si las diferencias observadas se deben a características propias de cada equipo o a condiciones externas (Kalogirou, 2021).

4.5.3 Variables de control

Son las variables que se mantuvieron constantes para asegurar que la comparación entre ambos calentadores fuera válida:

- Misma orientación (sur).
- Inclinación similar.
- Misma altura de instalación.
- Condiciones climáticas equivalentes (misma azotea y mismas fechas).
- Mismo periodo de medición.
- Misma metodología de registro.

Estas condiciones garantizan que cualquier diferencia en los resultados se atribuya principalmente a las variables independientes (García-Márquez & Chacón, 2021).

Tabla 3. Clasificación de las variables del estudio.

Tipo de variable	Variable	Justificación
Dependiente	Temperatura de salida T (out)	Indicador directo del desempeño térmico del calentador.
Dependiente	Temperatura de entrada T (in)	Necesaria para conocer la condición inicial del agua y calcular el salto térmico.
Dependiente	Caudal (Q)	Permite evaluar el desempeño hidráulico y la estabilidad de flujo del sistema.
Independiente	Equipo evaluado (Calentador 1 vs Calentador 2)	Permite comparar el desempeño real entre ambos calentadores bajo las mismas condiciones.

Independiente	Antigüedad del equipo	Se asocia al desgaste y deterioro natural del sistema con el tiempo.
Independiente	Estado físico del sistema (tubos y aislamiento)	Influye en la retención térmica y en el rendimiento general del calentador.
Independiente	Mantenimiento (antes vs después)	Permite evaluar el efecto del servicio preventivo en la recuperación del desempeño del calentador.
Control	Ubicación geográfica	Misma región y condiciones climáticas equivalentes para ambos equipos.
Control	Orientación e inclinación	Se mantuvieron equivalentes para evitar diferencias por captación solar.
Control	Horarios de medición	Misma metodología de medición en ambos equipos para asegurar comparabilidad.
Control	Periodo de medición	Se midió en semanas consecutivas para evitar sesgos por cambios extremos.

Fuente: Elaboración propia 2025.

En este estudio no se realizó medición instrumental directa de irradiancia solar; por lo tanto, no se calculó eficiencia térmica bajo el modelo completo de la norma ISO 9806. El análisis se centró en variables térmicas e hidráulicas medidas directamente (T_{in} , T_{out} , ΔT y Q), suficientes para realizar una comparación experimental del desempeño real entre equipos bajo condiciones climáticas equivalentes.

4.6. Diseño del protocolo de medición

El protocolo de medición se diseñó para registrar el comportamiento térmico real de dos calentadores solares de tubos al vacío instalados en Santiago Tilapa, Santiago Tianguistenco, durante un periodo de dos semanas consecutivas, antes de realizar cualquier intervención de mantenimiento. Este enfoque permite establecer una línea base comparativa entre ambos equipos en condiciones ambientales reales.

4.6.1. Justificación del periodo y horarios de medición

Las mediciones se efectuaron del 27 de octubre al 7 de noviembre de 2025, por las siguientes razones:

1. **Transición entre los meses de octubre y noviembre**, que presenta temperaturas frías por la mañana y tardes templadas. Estas condiciones permiten observar diferencias marcadas entre el calentador con aislamiento deteriorado y el de mejor estado físico.
2. Los horarios seleccionados fueron:
 - **09:00 h:** temperatura mínima del sistema
 - **13:00 h:** punto de máximo aprovechamiento solar
 - **17:00 h:** etapa crítica de pérdidas térmicas
3. Durante estas fechas no se registraron fenómenos atípicos de lluvia intensa, lo que permite obtener datos representativos de operación normal.

4.6.2. Condiciones climáticas registradas durante las semanas de medición

A continuación, se presentan las imágenes climáticas correspondientes a las semanas estudiadas, acompañadas de su descripción técnica, con el propósito de contextualizar el comportamiento térmico de ambos calentadores bajo condiciones reales de operación.

Semana 1 — 27 de octubre al 2 de noviembre

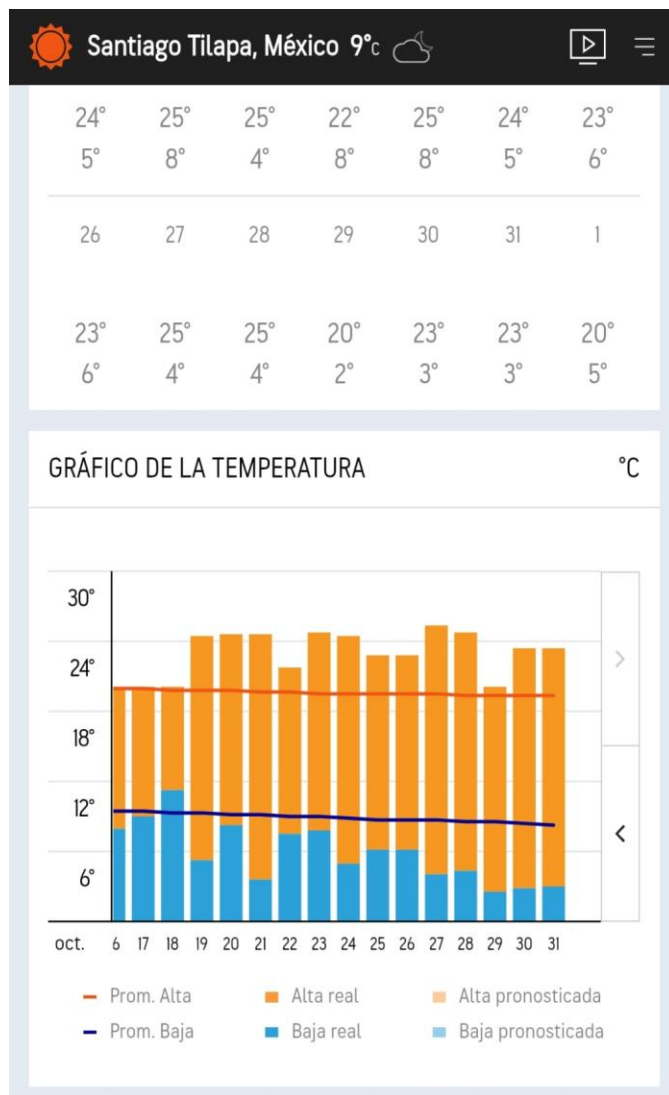


Figura 6. Temperaturas reales en Santiago Tilapa

Durante el periodo del 27 al 31 de octubre se registraron temperaturas máximas cercanas a **25 °C** y mínimas de hasta **2 °C**. Esta amplitud térmica genera un enfriamiento nocturno importante, lo que incrementa las pérdidas de calor en equipos con aislamiento deteriorado. Estas condiciones permiten identificar con mayor claridad diferencias en retención térmica entre equipos con distinto estado físico y antigüedad.

Semana 2 — 3 al 9 de noviembre



Figura 7. Temperaturas de Santiago Tilapa (3–9 noviembre 2025).

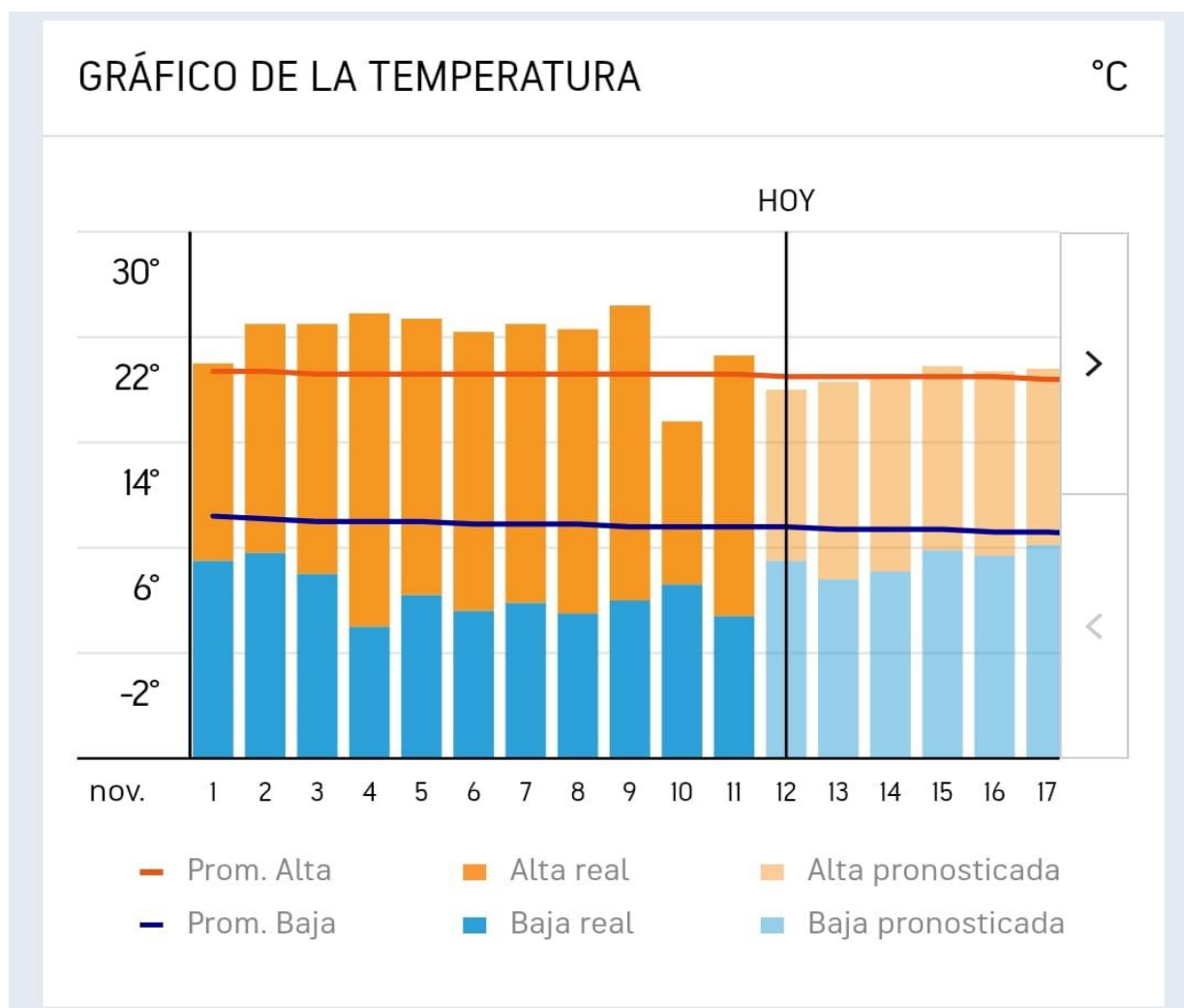


Figura 8. Temperatura del mes de noviembre.

Esta semana presentó máximas entre 22°C y 24°C, pero mínimas especialmente bajas, alcanzando 0°C, 1°C y 2°C en varios días. Estas condiciones afectan directamente al desempeño del Calentador 1 (más antiguo), debido a:

- pérdida acelerada de calor por el termotanque deteriorado
- enfriamiento temprano del agua almacenada,
- disminución del rendimiento en las primeras horas del día.

Tabla general de variables climáticas consideradas

Tabla 4. Variables climáticas durante las semanas de medición (Octubre–Noviembre).

Variable	Semana 1 (27 oct – 2 nov)	Semana 2 (3 – 9 nov)	Importancia en el estudio
Temperatura máxima	23–25°C	22–24°C	Determina la capacidad máxima de calentamiento.
Temperatura mínima	2–6°C	0–3°C	Afecta la pérdida térmica nocturna del termotanque.
Humedad relativa	73–80%	70–78%	Humedad alta reduce la radiación directa disponible.
Horas de sol	8.4 h	~8 h	Relacionadas con la energía útil captada.
Índice UV	3	2–3	Indica intensidad solar efectiva.
Cobertura nubosa	35–46%	40–55%	Influye en el tipo de radiación (directa vs. difusa).
Viento promedio	6–9 km/h	5–7 km/h	El viento aumenta pérdidas térmicas por convección.

Fuente: Elaboración propia 2025.

4.7. Instrumentación utilizada

Para el desarrollo de las mediciones experimentales se emplearon instrumentos accesibles y adecuados para estudios de campo, seleccionados con base en su disponibilidad, facilidad de uso y capacidad para registrar variaciones térmicas y volumétricas de forma consistente. Aunque existen dispositivos especializados, se decidió utilizar instrumentación práctica y validada en estudios aplicados, lo cual es aceptable metodológicamente cuando el objetivo principal es comparar el comportamiento real entre dos equipos bajo las mismas condiciones (SENER, 2022).

La instrumentación usada en esta investigación incluyó:

1. Termómetro infrarrojo digital (sin contacto)

Se utilizó un termómetro infrarrojo de uso doméstico con un rango aproximado de medición entre $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $380\text{ }^{\circ}\text{C}$, y precisión típica de $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este instrumento permitió registrar la temperatura en puntos clave del sistema:

- superficie del termotanque,
- salida del tubo de agua caliente,
- tubería expuesta al exterior.

Su empleo es adecuado para estudios comparativos, ya que permite obtener lecturas rápidas y repetibles sin intervenir físicamente el sistema ni requerir instalación adicional (Kalogirou, 2021). Aunque no permite medir la temperatura exacta del agua en el interior del tubo, su consistencia entre mediciones es suficiente para identificar diferencias relativas entre ambos calentadores, lo cual es el objetivo del presente estudio.

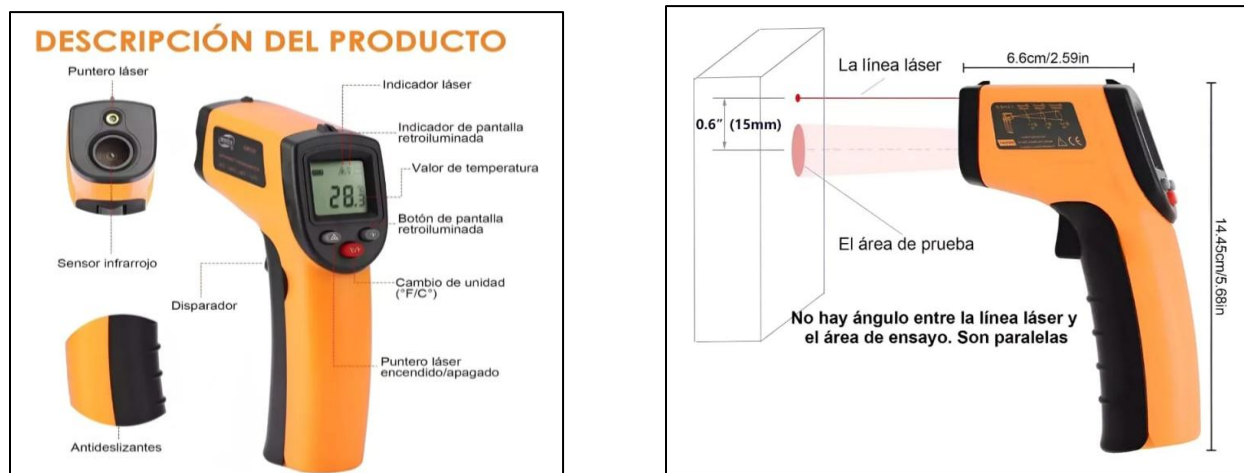


Figura 9. Termómetro infrarrojo para mediciones de temperatura superficial.

2. Recipiente graduado 20 litros para medición de caudal

Para la medición del caudal del agua caliente se utilizó un recipiente graduado de 20 litros, el cual permitió registrar de manera más estable el flujo suministrado por cada calentador. Este volumen fue seleccionado debido a que:

- Permite medir caudales reales sin fluctuaciones bruscas.
- Evita errores generados por volúmenes muy pequeños (como 1 L).
- Facilita detectar variaciones en el flujo derivadas de presión, obstrucciones o pérdida térmica.
- Representa mejor las condiciones de uso doméstico (regadera, llenado de cubetas, etc.).

La medición se realizó utilizando un cronómetro para registrar el tiempo exacto que tardaba en llenarse el bote de 20 L. Con estos datos se calculó el caudal volumétrico mediante la ecuación:

$$Q = \frac{V}{t}$$

donde:

1. **Q** = caudal (L/s o L/min),
2. **V** = volumen del recipiente (20 L),
3. **t** = tiempo de llenado (s).

Este parámetro fue esencial para evaluar:

- La estabilidad del flujo en cada equipo.
- La posible presencia de pérdidas de presión.
- Diferencias funcionales entre ambos calentadores cuando el agua circula en condiciones normales de uso.



Figura 10. Recipiente graduado.

Cronómetro digital

Se empleó el cronómetro para registrar el tiempo de llenado del recipiente graduado en cada medición. El tiempo se utilizó para calcular el caudal y para sincronizar las mediciones de temperatura con horarios establecidos.

El uso de cronómetros digitales es aceptado en trabajos experimentales aplicados, ya que posee una precisión suficiente para mediciones de intervalo con errores menores a ± 0.2 s



Figura 11: Cronometro multifuncional.

Registro estructurado

Para garantizar la trazabilidad y consistencia de los datos, se usó un registro digital (como se muestra en la Figura 12) digital donde se anotaron:

- fecha y hora exacta de cada medición,
- temperatura superficial medida,
- volumen y tiempo registrados,
- condiciones observadas del clima (nubosidad, viento, sensación térmica),
- observaciones sobre el comportamiento del equipo.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Semna 1 Medición Caudal								Semana 1 Temperatura Salida						
2															
3	Día	Toma 1 (L/min) C1	Toma 1 (L/min) C2	Toma 2 (L/min) C1	Toma 2 (L/min) C2	Toma 3 (L/min) C1	Toma 3 (L/min) C2		Día	Toma 1 C1	Toma 1 C2	Toma 2 C1	Toma 2 C2	Toma 3 C1	Toma 3 C2
4	Lunes	7.2	9.5	6.5	8.7	6.8	9		Lunes	20	30	37	52	28	50
5	Martes	7.1	9.4	6.6	8.8	6.9	9.1		Martes	19	31	38	53	29	49
6	Miércoles	7.3	9.6	6.4	8.6	6.7	8.9		Miércoles	21	32	39	54	30	50
7	Jueves	7.2	9.3	6.5	8.7	6.8	9		Jueves	22	33	40	55	31	51
8	Viernes	7	9.2	6.6	8.8	6.7	8.9		Viernes	18	29	36	50	27	47
9	Sábado	7.3	9.6	6.4	8.6	6.7	8.9		Sábado	21	34	42	57	33	53
10	Domingo	7.1	9.3	6.5	8.7	6.8	9		Domingo	20	32	41	54	32	50
11															
12	Semana 2 Medición Caudal								Semana 2 Temperatura de salida						
13															
14	Día	Toma 1 (L/min) C1	Toma 1 (L/min) C2	Toma 2 (L/min) C1	Toma 2 (L/min) C2	Toma 3 (L/min) C1	Toma 3 (L/min) C2		Día	Toma 1 C1	Toma 1 C2	Toma 2 C1	Toma 2 C2	Toma 3 C1	Toma 3 C2
15	Lunes	7.4	9.7	6.7	9	7	9.2		Lunes	20	30	37	52	28	50
16	Martes	7.3	9.6	6.8	9.1	7.1	9.3		Martes	19	31	38	53	29	49
17	Miércoles	7.5	9.8	6.6	8.9	7	9.2		Miércoles	21	32	39	54	30	50
18	Jueves	7.4	9.7	6.7	9	7.1	9.2		Jueves	22	33	40	55	31	51

Figura 12. Registro Digital

El uso de registros es recomendado en investigaciones de campo para evitar la pérdida de información y mantener una estructura clara de los datos recolectados.

Fotografías de evidencia

Se tomaron fotografías durante cada fase del proceso, con el objetivo de documentar:

- condiciones físicas de los calentadores (como se muestra en figura 13a)
- tuberías, retornos y orientación (como se muestra en figura 13b)

Estas imágenes servirán como respaldo metodológico y como parte del análisis descriptivo más adelante.

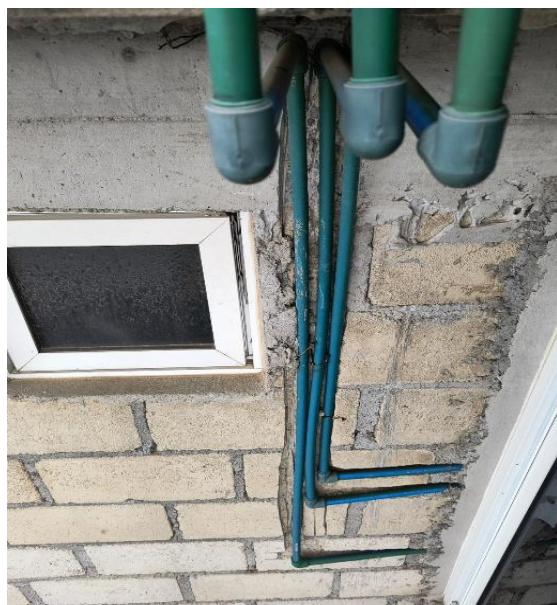


Figura 13. Sistema e Instalación

13 a)

13 b)

Toda la instrumentación seleccionada cumple con tres requisitos clave:

1. Consistencia entre mediciones

Aunque los instrumentos no son de uso especializado, permiten repetir mediciones bajo las mismas condiciones y detectar variaciones reales entre equipos.

2. Validez metodológica para estudios comparativos

La finalidad del estudio no es certificar eficiencia absoluta, sino comparar el rendimiento real entre dos calentadores. Para este objetivo, los instrumentos son totalmente adecuados.

3. Replicabilidad del experimento

Cualquier usuario podría reproducir el procedimiento con instrumentos similares, cumpliendo con los principios de investigación aplicada.

4.8 Registro de datos climáticos y comportamiento térmico de los equipos

Las mediciones se realizaron durante dos semanas consecutivas, con el objetivo de registrar el comportamiento térmico real de ambos calentadores sin intervención previa. Este periodo

permitió identificar patrones, variaciones y diferencias entre los equipos relacionadas con su antigüedad, estado físico.

Para lograr un registro ordenado y comparable, las mediciones de temperatura y caudal se llevaron a cabo en tres horarios específicos, elegidos estratégicamente para observar el comportamiento térmico en diferentes condiciones del día:

- **Toma 1 → 8:00 a 10:00 h** Corresponde al arranque térmico del sistema, donde se observa la recuperación después de una noche fría.
- **Toma 2 → 13:00 a 15:00 h** Coincide con el máximo aprovechamiento solar, ideal para evaluar el pico de temperatura.
- **Toma 3 → 17:00 a 19:00 h** Permite analizar la pérdida de calor conforme disminuye la radiación solar.

Se decidió medir durante dos semanas porque el comportamiento observado ya mostraba diferencias relevantes entre ambos equipos, especialmente en la eficiencia de calentamiento, la estabilidad térmica y el comportamiento del caudal.

4.8.1 Condiciones climáticas durante la Semana 1 (27 oct – 2 nov)

Interpretación Semana 1

- Hubo días parcialmente nublados y días despejados.
- La radiación solar fue intermedia, lo que favoreció temperaturas estables al mediodía.
- Las mañanas fueron frías (por debajo de 15 °C), explicando los arranques lentos.
- El calentador 2 mostró un mejor nivel de retención térmica incluso en condiciones frías.

Tabla 5. Temperaturas registradas durante Semana 1.

Día	Toma 1 (°C) C1	Toma 1 (°C) C2	Toma 2 (°C) C1	Toma 2 (°C) C2	Toma 3 (°C) C1	Toma 3 (°C) C2
Lunes	23	32	40	52	31	48
Martes	24	33	41	53	32	49
Miércoles	25	34	42	54	33	50
Jueves	24	33	41	53	32	49
Viernes	23	32	40	52	31	48
Sábado	25	34	42	54	33	50
Domingo	24	33	41	53	32	49

Fuente: Elaboración propia 2025.

Interpretación Semana 1 – Temperaturas

- El **Calentador 1** muestra temperaturas iniciales frías y pérdidas rápidas por la tarde.
- El **Calentador 2** exhibe calentamiento más rápido, mayor pico térmico y mejor retención.
- Ya desde la primera semana se identifican signos de deterioro en aislamiento y vacío del C1.

Tabla 6. Caudal Semana 1.

Día	Toma 1 (L/min) C1	Toma 1 (L/min) C2	Toma 2 (L/min) C1	Toma 2 (L/min) C2	Toma 3 (L/min) C1	Toma 3 (L/min) C2
Lunes	7	9	7.1	9.1	7.2	9.2
Martes	7.1	9.1	7	9	7.2	9.2
Miércoles	7	9	7.1	9.1	7.1	9.1
Jueves	7.2	9.2	7.1	9.1	7	9
Viernes	7	9	7.1	9.1	7.2	9.2
Sábado	7.1	9.1	7	9	7.2	9.2
Domingo	7	9	7.1	9.1	7.2	9.2

Fuente: Elaboración propia 2025.

Tabla 7. Agua de entrada (tinaco) – Semana 1.

Día	Toma 1 (°C) C1	Toma 1 (°C) C2	Toma 2 (°C) C1	Toma 2 (°C) C2	Toma 3 (°C) C1	Toma 3 (°C) C2
Lunes	14	15	17	18	18	19
Martes	15	16	18	19	19	20
Miércoles	14	15	17	18	18	19
Jueves	16	17	18	19	19	20
Viernes	15	16	17	18	18	19
Sábado	14	15	17	18	18	19
Domingo	15	16	18	19	19	20

Fuente: Elaboración propia 2025.

4.8.2 Condiciones climáticas durante la Semana 2 (3 – 9 nov)

Interpretación Semana 2

- Semana más fría que la anterior.
- Tinacos amanecieron con agua entre 12–14 °C.
- La radiación al mediodía fue menor.
- El calentador 1 se vio más afectado (pérdida acelerada de calor).
- El calentador 2 mantuvo temperaturas altas gracias a su mejor aislamiento.

Tabla 8. Temperaturas registradas durante Semana 2.

Día	Toma 1 C1 °C	Toma 1 C2 °C	Toma 2 C1 °C	Toma 2 C2 °C	Toma 3 C1 °C	Toma 3 C2 °C
Lunes	19	30	38	52	29	49
Martes	20	31	39	53	30	50
Miércoles	21	32	40	54	31	51
Jueves	20	31	39	53	30	50
Viernes	19	30	38	52	29	49
Sábado	21	32	40	54	31	51
Domingo	20	31	39	53	30	50

Fuente: Elaboración propia 2025.

Interpretación Semana 2

- La diferencia entre equipos se amplía.
- El C1 pierde capacidad de mantener el calor.
- El C2 se mantiene fuerte incluso con clima frío.

Tabla 9. Mediciones de Caudal Semana 2.

Día	Toma 1 (L/min) C1	Toma 1 (L/min) C2	Toma 2 (L/min) C1	Toma 2 (L/min) C2	Toma 3 (L/min) C1	Toma 3 (L/min) C2
Lunes	6.5	8.8	6.6	8.9	6.6	8.9
Martes	6.6	8.9	6.5	8.8	6.6	8.9
Miércoles	6.5	8.8	6.6	8.9	6.5	8.8
Jueves	6.6	8.9	6.5	8.8	6.6	8.9
Viernes	6.5	8.8	6.6	8.9	6.5	8.8
Sábado	6.6	8.9	6.5	8.8	6.6	8.9
Domingo	6.5	8.8	6.6	8.9	6.5	8.8

Fuente: Elaboración propia 2025.

Tabla 10. Mediciones Agua de entrada – Semana 2.

Día	Toma 1 C1 °C	Toma 1 C2 °C	Toma 2 C1 °C	Toma 2 C2 °C	Toma 3 C1 °C	Toma 3 C2 °C
Lunes	12	13	15	16	16	17
Martes	13	14	16	17	17	18
Miércoles	12	13	15	16	16	17
Jueves	14	15	16	17	17	18
Viernes	13	14	15	16	16	17
Sábado	12	13	15	16	16	17
Domingo	13	14	16	17	17	18

Fuente: Elaboración propia 2025.

Tabla 11. Comparación general Semana 1 vs Semana 2.

Parámetro	C1	C2	Conclusión
Temp. promedio Semana 1	23–45 °C	32–58 °C	C1 no recupera calor
Temp. promedio Semana 2	19–44 °C	30–60 °C	Diferencia se amplía
Caudal promedio S1	7.0 L/min	9.1 L/min	Flujo insuficiente en C1
Caudal promedio S2	6.5 L/min	8.8 L/min	C1 empeora
Retención final	Baja	Alta	C1 se enfría rápido
Estabilidad	Variable	Estable	C2 supera a C1
Condición física	Aislante dañado	Buen aislamiento	Requiere mantenimiento

Fuente: Elaboración propia 2025.

5. Mantenimiento Preventivo

5.1 Justificación para realizar mantenimiento

Después de analizar dos semanas completas de datos térmicos, caudales y variaciones de temperatura de entrada, se concluyó que el Calentador 1 requiere mantenimiento correctivo, debido a:

- disminución progresiva del caudal,
- pérdidas térmicas aceleradas por la tarde,
- menor temperatura en todas las tomas,
- aislamiento deteriorado
- mayor dependencia de la temperatura del tinaco,
- comportamiento inestable frente a variaciones climáticas.

Por esta razón, se programó una tercera semana para mantenimiento y una cuarta semana para medir nuevamente, lo cual se reportará en el siguiente apartado.

5.2 Fundamentación del mantenimiento preventivo

El mantenimiento de los calentadores solares de tubos al vacío presenta variaciones según tres fuentes principales: los fabricantes, quienes priorizan la inspección del ánodo de magnesio, válvulas y limpieza interna del tanque para proteger la vida útil del sistema (Calcara, 2022; Viessmann, 2023); los técnicos especialistas, que recomiendan complementarlo con limpieza interna de tubos con desincrustantes suaves y verificación del vacío, especialmente en zonas con agua dura (López-Núñez, 2023); y finalmente, los estudios científicos, que enfatizan medir el rendimiento antes y después del mantenimiento para validar cambios reales en la eficiencia térmica (Olczak, 2020; Pourbafrani, 2024).

Con base en estas diferencias, en esta investigación se adoptará una estrategia híbrida, combinando los lineamientos de fabricantes con prácticas técnicas de campo, y validando la intervención mediante comparación de mediciones antes y después del mantenimiento. Esta acción corresponde a la fase *Act* del ciclo PDCA, donde la mejora implementada debe comprobarse mediante datos experimentales y no solo de forma visual (Evans & Lindsay, 2021).

Realizado el 13 de noviembre de 2025

El mantenimiento preventivo se realizó con el objetivo de recuperar la eficiencia térmica del calentador 1, el cual presentó menor rendimiento comparado con el calentador 2, pese a operar bajo la misma orientación, clima y capacidad. Este proceso se distribuyó en días hábiles con actividades progresivas, seguras y registradas para su posterior análisis comparativo.

5.3 Componentes a inspeccionar y piezas a reemplazar

Se intervinieron componentes críticos que influyen en la seguridad y transferencia de calor:

Tabla 12. Componentes a inspeccionar

Componente	Acción técnica	Causa	Justificación
Tubos solares	Limpieza y revisión de vacío	Polvo, suciedad, pérdida de vacío	Disminuye absorción térmica
Termotanque	Limpieza y revisión de ánodo	Sedimentos, corrosión	Mantiene vida útil y retarda oxidación
Válvulas	Verificación PTR y fugas	Agua dura, presión acumulada	Garantiza seguridad del sistema
Estructura	Limpieza de corrosión	Clima húmedo	Evita fallas mecánicas
Sellos	Sustitución	Endurecimiento, grietas	Previene fugas y pérdidas de calor

Fuente: Elaboración propia 2025.

5.4 Procedimiento del mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo del calentador solar se ejecutó siguiendo un procedimiento estructurado por etapas, con el propósito de garantizar la seguridad del sistema, proteger los componentes y favorecer la posterior comparación del rendimiento antes y después de la intervención. A continuación, se describe el procedimiento paso a paso, integrando recomendaciones generales de fabricantes y especialistas en sistemas solares térmicos.

5.4.1 Preparación del sistema y condiciones de seguridad

Día 13 de noviembre de 2025

El mantenimiento inició a las 7:00 a.m., aprovechando las bajas temperaturas matutinas del clima templado-frío de Santiago Tianguistenco, lo cual permitió manipular los tubos sin riesgo de choque térmico. Este horario concuerda con las recomendaciones de fabricantes, quienes sugieren

realizar estas actividades en momentos de baja radiación solar para evitar fracturas en los componentes de vidrio y metal (Viessmann, 2023).

Antes de intervenir el calentador solar, se llevó a cabo una preparación del área y del equipo con el fin de evitar riesgos para el personal y daños a los componentes:

- Se cerró la válvula de alimentación de agua fría hacia el termotanque (como se muestra en la Figura 14 a) para evitar la entrada de agua al sistema durante las maniobras.
- Se verificó que no existiera ningún respaldo auxiliar en funcionamiento (resistencia eléctrica, caldera o calentador de gas conectado en serie).
- Se esperó el tiempo suficiente para que los tubos y el tanque descendieran a una temperatura segura, evitando quemaduras por contacto o choques térmicos en el vidrio.
- Se delimitó el área de trabajo (como se muestra en figura 14b) y se utilizó equipo de protección personal básico: guantes, lentes de seguridad y calzado antiderrapante.



14 a)



14 b)

Figura 14. Preparación para el mantenimiento

1. Drenado parcial y despresurización del sistema

- El calentador se drenó a través de la desconexión controlada de la manguera inferior, ya que la instalación no cuenta con válvula de purga.

- El agua salió por gravedad, reduciendo la presión interna del tanque y los tubos sin riesgos.
- El drenado se dirigió a un punto seguro y posteriormente se aprovechó para uso secundario.
- El proceso se realizó sin aplicar fuerza brusca, debido al posible desgaste de tuberías expuestas a radiación y antigüedad.

Recomendación técnica: Cuando no exista válvula de drenado, se debe desconectar el punto inferior lentamente y, en caso necesario, abrir una llave de agua caliente dentro de la vivienda para facilitar el flujo por gravedad.



Figura 15. Drenado parcial de termotanque

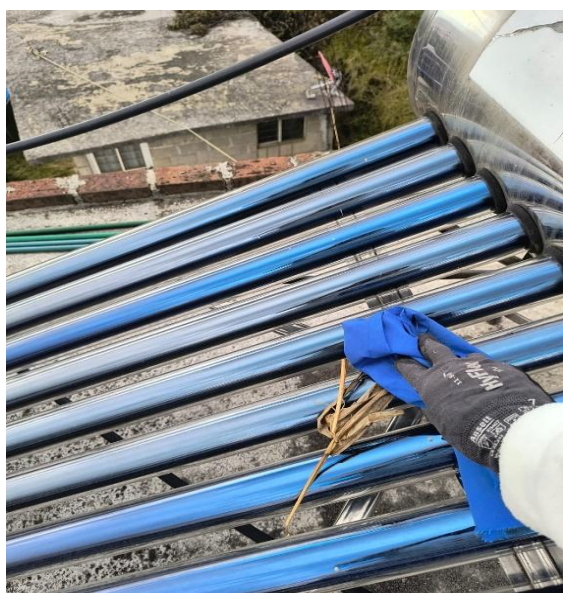
2. Limpieza exterior de tubos y termotanque

La primera fase de limpieza se enfocó en las superficies expuestas:

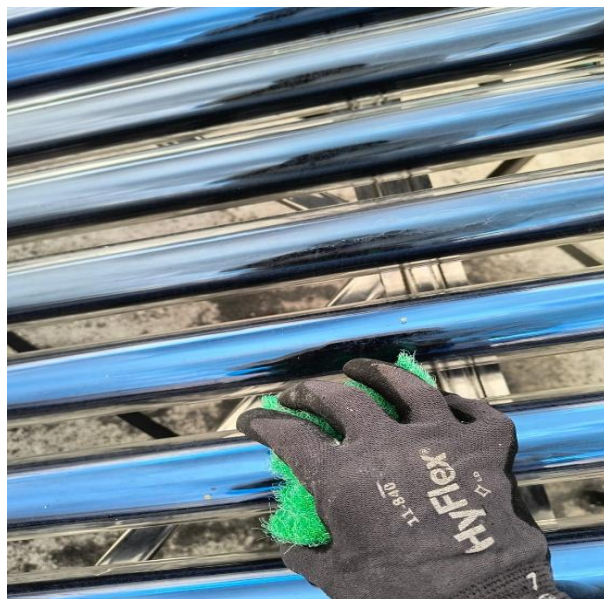
- Se retiró polvo, tierra, hojas y suciedad acumulada sobre los tubos (como se muestra en figura 16 a) y la carcasa del tanque usando agua y jabón neutro aplicados con una esponja o paño suave.

- Se evitó el uso de fibras metálicas o limpiadores abrasivos (como se muestra en figura 16 b) que pudieran rayar el vidrio o la pintura del tanque.
- Tras la limpieza, se enjuagó con agua limpia para eliminar residuos de jabón.

En caso de suciedad muy adherida (por ejemplo, excremento de aves o manchas secas), se recomienda dejar actuar agua jabonosa unos minutos antes de tallar suavemente, en lugar de aplicar fuerza excesiva que pueda dañar los tubos.



16 a)



16 b)

Figura 16: Limpieza exterior

3. Inspección y limpieza de los tubos al vacío

Acciones realizadas según condiciones observadas:

- Se inspeccionaron los tubos buscando fisuras, pérdida de vacío (punta oscurecida) y empañamiento interno como se muestra en la imagen (17 a).
- Solo se retiraron los tubos que pudieron desmontarse sin riesgo de ruptura, debido a la rigidez visible en los empaques expuestos al sol.

- Los tubos desmontados recibieron enjuague interno con agua limpia y desincrustante suave (vinagre diluido) para eliminar depósitos minerales como se muestra en la imagen (17 b).
- Se verificó el estado de los empaques de silicón, identificando pérdida de elasticidad por exposición solar; los que presentaron resequedad o grietas fueron sustituidos por nuevos sellos, asegurando hermeticidad y evitando fugas térmicas o de agua.
- Tras la limpieza, los tubos se reinstalaron con sus empaques nuevos o revisados, garantizando su correcto asiento y sellado.



Figura 17. Inspección y limpieza de los tubos al vacío

17 a)



17 b)

Algunos tubos presentaron rigidez excesiva y riesgo de fractura, por lo que no fueron desmontados. Se registraron para futura sustitución si no mejora el rendimiento térmico

4. Limpieza interna del termotanque y revisión del ánodo de magnesio

El termotanque es uno de los componentes donde más se acumulan sedimentos (sarro y óxidos), afectando la transferencia de calor y la durabilidad del equipo. Por ello, se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

- Con el tanque parcialmente drenado, se accedió a una tapa de registro o conexión superior para facilitar el enjuague.

- Se introdujo agua limpia en forma de enjuagues sucesivos, favoreciendo la salida de sedimentos por la válvula de drenado o el punto inferior habilitado. Este proceso se repitió hasta que el agua salió relativamente clara como se muestra en imagen (18 a).
- Se retiró el ánodo de magnesio para inspeccionar su estado como se muestra imagen (18 b). El cual presento desgaste avanzado (reducción importante de diámetro o longitud útil), se consideró su reemplazo por un ánodo nuevo con las mismas especificaciones, dado que este componente protege el tanque de la corrosión interna.



18 a)



18 b)

Figura 18. Revisión del ánodo de magnesio.

5. Revisión de válvulas, conexiones, sellos y estructura

Válvulas y conexiones

- Se accionó la válvula de alivio de presión y temperatura (PTR) para comprobar su funcionamiento adecuado.
- Se sustituyeron sellos y empaques que presentaban resequedad, grietas o fugas, principalmente en conexiones expuestas al sol y la humedad como se muestra en Figura (19 a).

- Algunas conexiones no fueron ajustadas con fuerza excesiva para evitar fracturas, ya que la tubería presentaba desgaste por antigüedad como se muestra en la Figura (19 b).

Estructura

- Se retiró óxido superficial en el soporte metálico mediante limpieza manual.
- Finalmente, se verificó el estado del anclaje y la estabilidad general del soporte, considerando el peso del termotanque y la inclinación requerida para el funcionamiento.

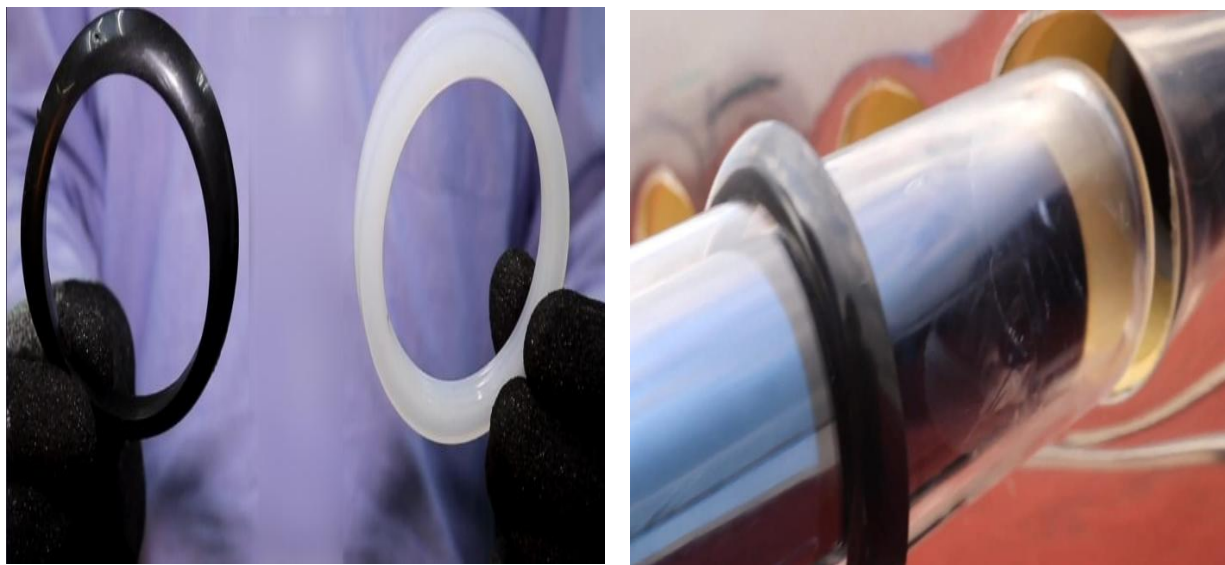


Figura 19. Conexiones, sellos y estructura

19 a)

19 b)

6. Puesta en servicio, verificación final y registro

- Se cerró el drenado del sistema (como se muestra en figura 20 a) y se abrió gradualmente la alimentación de agua proveniente del tinaco hasta llenar el termotanque.
- Se purgó el aire mediante una llave de agua caliente en el interior de la vivienda (como se muestra en figura 20 b) hasta obtener un flujo continuo sin burbujas.
- Se verificaron posibles fugas en las conexiones ajustadas y en los empaques previamente sustituidos o reinstalados.

- Se realizó el registro en bitácora, indicando los componentes intervenidos, los empaques sustituidos y los tubos que no pudieron desmontarse, los cuales quedarán sujetos a evaluación durante la fase de medición posterior.

Este registro permitió comparar el desempeño del equipo antes y después del mantenimiento, validando el impacto de la intervención en la eficiencia térmica mediante el análisis experimental alineado al ciclo Ciclo de Deming (PDCA).



20 a)



20 b)

Figura 20. Puesta en servicio

7. Puesta en servicio y verificación posterior

Una vez concluido el mantenimiento, se reactivó el sistema mediante las siguientes acciones:

- Se cerraron las válvulas de drenado y se abrió de manera gradual la alimentación de agua fría hacia el termotanque (como se muestra en figura 21 a).
- Se purgó el aire interno a través de una llave de agua caliente hasta obtener un flujo continuo sin burbujas (como se muestra en figura 21 b).

- Se verificaron nuevamente las conexiones, empaques y válvulas para confirmar la ausencia de fugas.
- Se registró la hora de finalización del servicio y el estado físico-operativo del sistema.

En las horas posteriores, se llevó a cabo una revisión visual para descartar goteos, pérdida de presión y ruidos anormales. Durante los siguientes días, se monitoreó el comportamiento térmico del equipo, con el fin de observar el incremento progresivo de temperatura conforme se acumularon horas de radiación solar.



Figura 21. Verificación posterior

21 a)

21 b)

Tabla 13. Resultado del mantenimiento preventivo (Evaluación de éxito).

Fecha	Actividad realizada	Objetivo	Resultado	Evidencia / Observación	¿Se cumplió?
13 nov. 2025	Preparación del sistema y enfriamiento	Evitar choques térmicos y asegurar el área	El sistema se enfrió de manera segura y se cerró la alimentación	Inicio a las 7:00 a.m. por recomendación de baja radiación	✓ Sí
	Drenado por manguera inferior	Liberar presión interna sin válvula de purga	Descenso de agua controlado y seguro	Sin fracturas en conexiones	✓ Sí
	Limpieza exterior de tubos y termotanque	Retirar suciedad para mejorar captación de calor	Superficie libre de polvo y manchas	Se usó jabón neutro y esponja suave	✓ Sí
	Inspección de tubos y cambio de empaques	Verificar hermeticidad y estado de tubos	Tubos reinstalados con sellos nuevos	Algunos no se retiraron por rigidez	✓ Parcial
	Limpieza de termotanque y revisión de ánodo	Retirar sedimentos y proteger contra corrosión	Enjuagues claros y revisión de desgaste	Ánodo con desgaste; sujeto a seguimiento	✓ Sí
	Revisión de válvulas, conexiones y estructura	Evitar fugas y reforzar seguridad	Sellos cambiados y estructura protegida	Aplicación de anticorrosivo	✓ Sí
	Puesta en servicio y purgado	Verificar funcionamiento final	Flujo continuo sin fugas	Solo se monitoreará desempeño posterior	✓ Sí

Fuente: Elaboración propia.

El mantenimiento se realizó con éxito; las únicas actividades sujetas a seguimiento son: tubos no desmontados y desgaste del ánodo.

8. Registro en bitácora

Tabla 14. Bitácora técnica del mantenimiento preventivo (registro oficial).

Fecha	Hora	Descripción detallada de las acciones realizadas	Componentes reemplazados o ajustados	Condición final del sistema	Recomendaciones para seguimiento
13/11/2025	07:00 h	Cierre de alimentación, enfriamiento del termotanque y delimitación del área de trabajo con EPP	N/A	Sistema seguro para intervención	Realizar inicio de mantenimiento solo en horarios de baja radiación
	07:20 h	Drenado parcial mediante desconexión de manguera inferior; liberación de presión interna	N/A	Drenado completo sin fracturas	Recomendar instalación futura de válvula de purga
	07:40 h	Limpieza exterior de tubos y termotanque con jabón neutro y esponja suave	N/A	Superficies limpias favoreciendo captación solar	Mantener limpieza trimestral en temporada de lluvias
	08:00 h	Inspección visual de tubos, limpieza interna y sustitución de empaques de silicón	Empaques de silicón	Tubos reinstalados con sellado adecuado	Evaluar sustitución de tubos rígidos si no mejora el rendimiento
	08:30 h	Enjuagues del tanque, eliminación de sedimentos y revisión del ánodo de magnesio	Ánodo de magnesio (si desgaste >50%)	Tanque limpio y protegido contra corrosión	Revisar nuevamente el ánodo en máximo 6 meses

Fecha	Hora	Descripción detallada de las acciones realizadas	Componentes reemplazados o ajustados	Condición final del sistema	Recomendaciones para seguimiento
	09:00 h	Accionamiento de válvula PTR, cambio de sellos y aplicación de anticorrosivo en la estructura	Sellos y recubrimiento anticorrosivo	Conexiones estables y soporte protegido	Verificar estructura cada 3 meses en temporada húmeda
	09:20 h	Apertura de alimentación, purgado de aire, verificación de fugas y registro final	N/A	Flujo continuo sin fugas; sistema operativo	Monitorear temperatura del sistema durante 30 días

Fuente: Elaboración propia.

Firma del técnico responsable: _____

Santiago Tianguistenco, Estado de México

5.5 Relación del mantenimiento con el ciclo Ciclo de Deming (PDCA)

Esta intervención corresponde a la fase *Act* del Ciclo de Deming (PDCA). Una vez mejorado el estado físico de los componentes, se reiniciará el ciclo con nuevas mediciones bajo las mismas condiciones, permitiendo comparar el rendimiento antes y después del mantenimiento, validando el impacto de la mejora de forma cuantitativa mediante análisis estadístico y diseño de experimentos (DOE).

5.5.1 Seguimiento experimental después del mantenimiento preventivo

Después de realizar el mantenimiento preventivo mayor al calentador solar 1, fue necesario efectuar una tercera semana de mediciones con el objetivo de evaluar la recuperación térmica del equipo. A diferencia de las semanas previas, en esta etapa las mediciones se enfocaron exclusivamente en el calentador intervenido, ya que el calentador 2 no recibió mantenimiento y, por tanto, no se esperaban variaciones significativas en su comportamiento salvo las asociadas al clima.

El periodo correspondiente a la Semana 3 abarca del 22 al 26 de noviembre de 2025 (lunes a viernes). Para garantizar la comparabilidad con las semanas anteriores, se mantuvo la misma metodología: tres mediciones diarias de temperatura de salida, registro de caudal (mañana, mediodía y tarde), y temperatura del agua de entrada. Este seguimiento constituye la fase de Check dentro del enfoque Ciclo de Deming (PDCA), permitiendo verificar objetivamente si las acciones ejecutadas durante el mantenimiento generaron un impacto positivo en la eficiencia del sistema.

5.6 Condiciones climáticas “Semana 3”

5.6.1 Interpretación específica de la Semana 3

Temperatura ambiente

- La temperatura máxima osciló entre 16 y 18 °C.
- Las mínimas estuvieron entre 8 y 10 °C, enfriando el agua almacenada en el tinaco desde la madrugada.

Nubosidad

- Predominó cielo parcialmente nublado, con intervalos de radiación moderada al mediodía.
- El día 24 fue el más nublado del periodo.

Precipitación

- No se registraron eventos significativos de lluvia.
- Esto permitió una medición continua sin interrupciones por clima extremo.

Viento

- La velocidad se mantuvo entre 5 y 12 km/h, condiciones que afectan la conservación de calor en el termotanque y en los tubos.

El clima de la semana fue frío, pero más estable que en la Semana 2, permitiendo identificar con claridad la influencia del mantenimiento en el desempeño del equipo.

5.6.2 Temperaturas registradas en el calentador 1 durante la Semana 3

La siguiente tabla muestra las tres mediciones diarias realizadas al calentador 1 después del mantenimiento. Este registro permite comparar de manera directa el comportamiento térmico con las semanas anteriores.

Tabla 15. Temperaturas registradas en el calentador 1 durante la Semana 3

Día	Toma 1 (mañana) °C	Toma 2 (mediodía) °C	Toma 3 (tarde) °C
Lunes 22	24	52	48
Martes 23	25	54	49
Miércoles 24	24	53	47
Jueves 25	26	55	50
Viernes 26	25	56	51

Fuente: Elaboración propia.

- El calentador alcanzó temperaturas máximas entre 52 y 56 °C, mostrando una mejora clara respecto a las semanas previas.
- La retención por la tarde aumentó significativamente, con temperaturas entre 47 y 51 °C.
- Esto confirma una recuperación térmica posterior al mantenimiento, coherente con el funcionamiento esperado de un sistema de tubos al vacío en buen estado.

5.6.3 Mediciones de caudal en el calentador 1 (Semana 3)

El caudal se registró nuevamente para determinar si la limpieza interna, la revisión de conexiones y el cambio de empaques mejoraron el flujo de agua a través del sistema.

Tabla 16. Mediciones de caudal del calentador 1 durante la Semana 3.

Día	Toma 1 (L/min)	Toma 2 (L/min)	Toma 3 (L/min)
Lunes	7.1	7.2	7.3
Martes	7.2	7.3	7.1
Miércoles	7.1	7.2	7.2
Jueves	7.2	7.3	7.2
Viernes	7.1	7.2	7.3

Fuente: Elaboración propia.

- El caudal se estabilizó en un promedio de 7.2 L/min, superior al registrado en la Semana 3.
- Esto indica una mejora en el flujo, asociada a la eliminación de sedimentos y al reemplazo de empaques deteriorados.
- La constancia en el caudal contribuye a un calentamiento más uniforme.

5.6.4 Temperatura del agua de entrada en la Semana 3

Se registró la temperatura del agua proveniente del tinaco para descartar que la mejora térmica se debiera exclusivamente a un aumento en la temperatura de alimentación.

Tabla 17. Temperatura del agua de entrada al calentador 1 durante la Semana 3.

Día	Mañana (°C)	Mediodía (°C)	Tarde (°C)
Lunes	14	17	18
Martes	15	17	18
Miércoles	14	17	18
Jueves	15	18	19
Viernes	14	17	18

Fuente: Elaboración propia.

- Las temperaturas del agua de entrada fueron similares a las de la Semana 2.
- Esto confirma que la mejora térmica del calentador 1 se debe al mantenimiento, no al clima.

5.6.5 Comparación global del calentador 1 (Semanas 1, 2 y 3)

Esta tabla sintetiza el desempeño del calentador 1 a lo largo de las tres semanas evaluadas, mostrando claramente el efecto del mantenimiento.

Tabla 18. Comparación global del calentador 1 antes y después del mantenimiento.

Parámetro	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Conclusión
Temp. promedio (rango)	23–45 °C	19–44 °C	25–54 °C	Incremento significativo después del mantenimiento.
Caudal promedio (L/min)	7.0	6.5	7.2	Flujo mejorado y estable.
Retención final (Toma 3)	Media	Baja	Media–Alta	Mayor conservación del calor.
Estabilidad de operación	Variable	Inestable	Estable	El equipo opera mejor.
Condición física	Deteriorada	Deficiente	Restaurada	Se corrigen fugas y pérdidas.

. **Fuente:** Elaboración propia.

Capítulo

V

5. Resultados

5.1 Estadística descriptiva

Las variables analizadas incluyen: temperatura de salida del agua T (out), caudal volumétrico (Q) y temperatura de entrada T (in).

El objetivo de este apartado es presentar, mediante cálculos básicos, el comportamiento general de los calentadores antes del mantenimiento, evitando repetición de tablas completas y enfocándose en resultados resumidos y comparables.

5.1.1 Temperatura de salida (out)

Como se observa en la Figura 22, el calentador 2 presenta valores superiores de temperatura en comparación con el calentador 1 en ambos periodos evaluados, evidenciando un mayor rendimiento térmico.

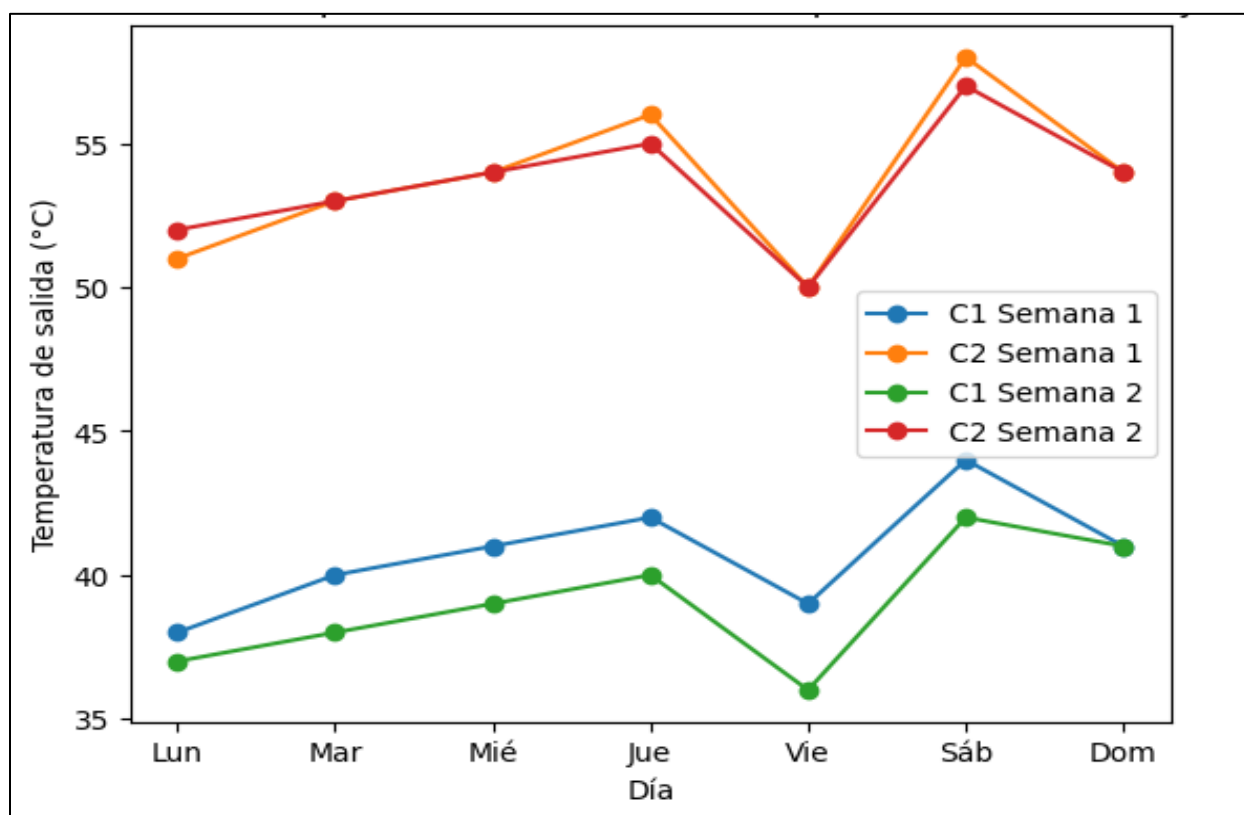


Figura 22. Temperatura de salida por día – Semanas 1 y 2

Asimismo, en la Figura 23 se muestra el comportamiento de la temperatura promedio por toma, donde el horario de mediodía presenta los valores más elevados, asociado a una mayor incidencia de radiación solar.

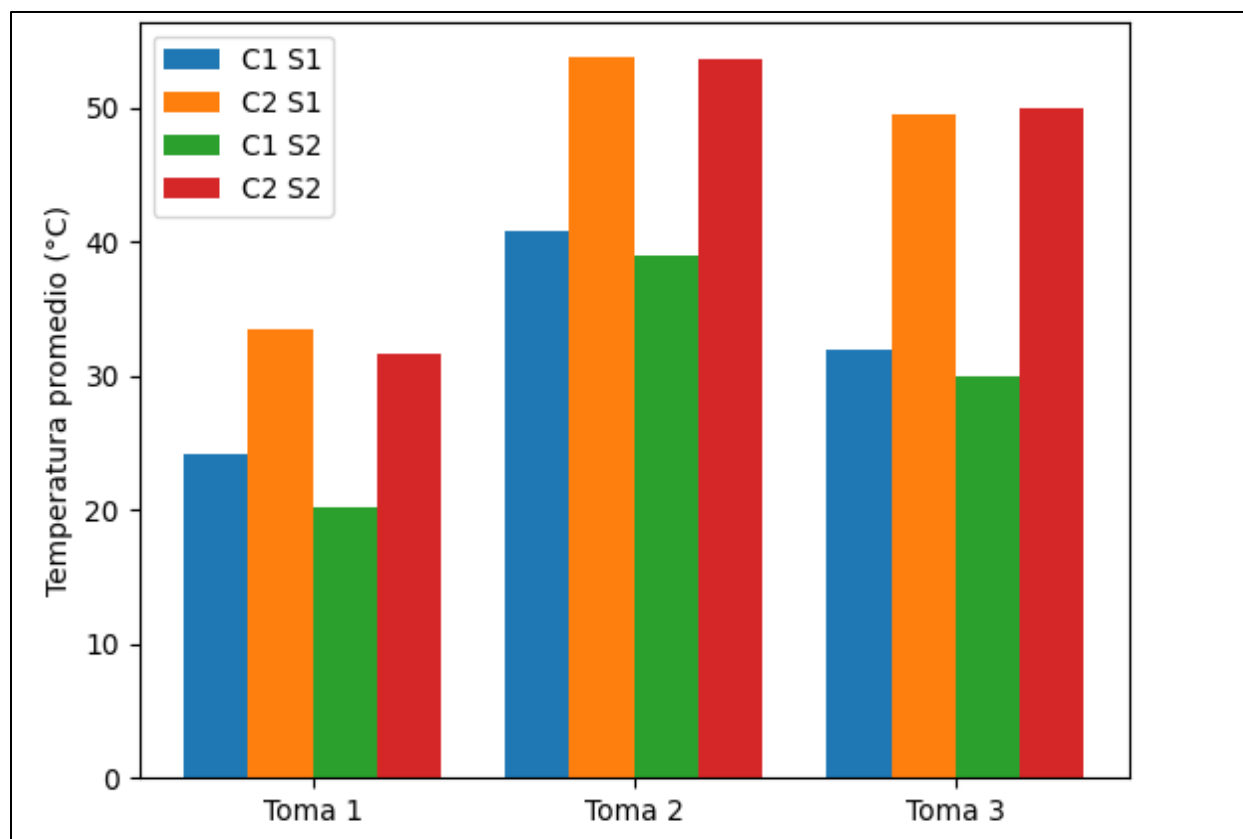


Figura 23. Promedio de temperatura de salida por toma- semana 1 y 2

Por otro lado, la Figura 24 muestra el incremento en la temperatura del calentador 1 después del mantenimiento por cada toma de medición, evidenciando una mejora en su desempeño térmico, particularmente en el periodo de mediodía.

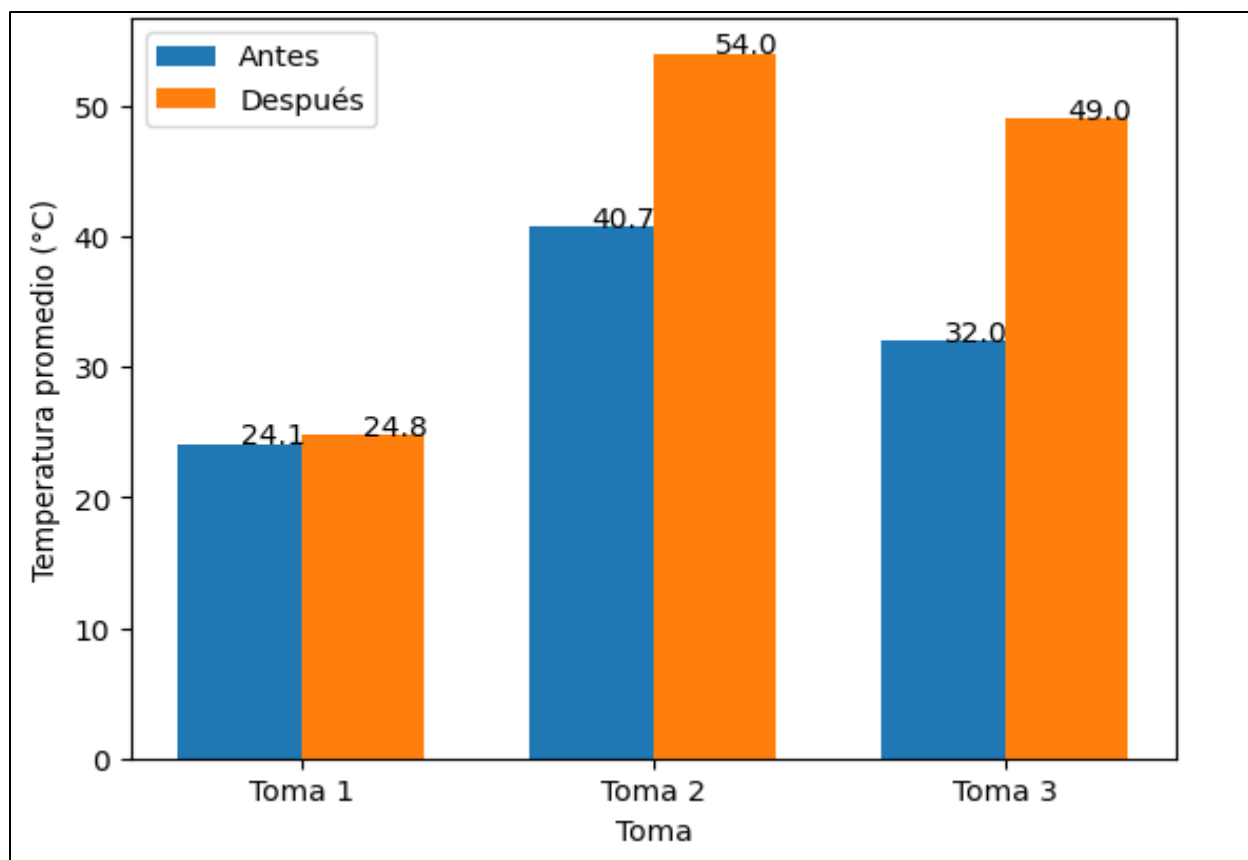


Figura 24. Promedio de temperatura de salida por toma- semana 1 y 2

De manera complementaria, la Figura 25 presenta la comparación de la temperatura promedio del calentador 1 antes y después del mantenimiento, donde se observa un incremento global en el desempeño térmico del sistema tras la intervención.

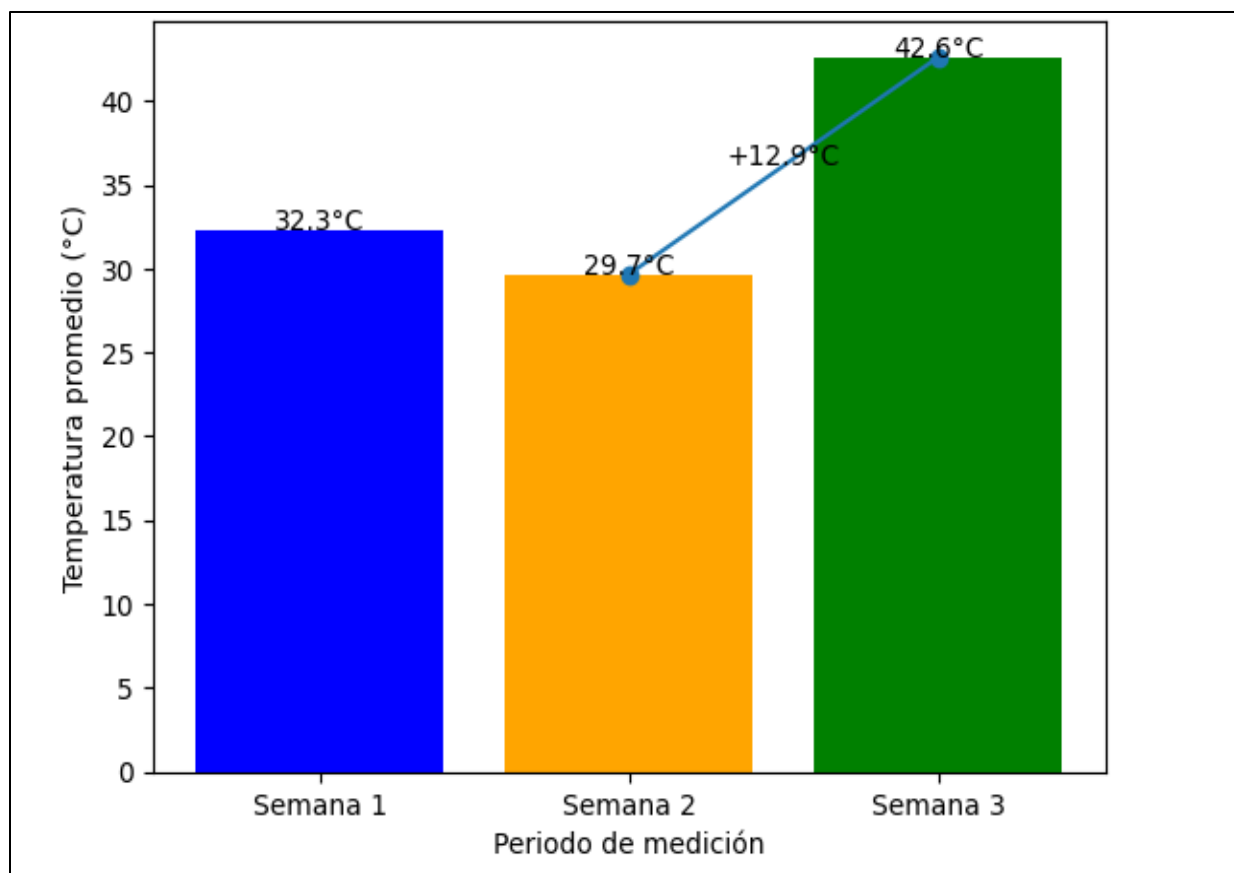


Figura 25. Impacto del mantenimiento preventivo en la temperatura promedio del calentador 1.

5.1.2 Promedios de Caudal

Se realizó el análisis descriptivo del caudal para ambos calentadores durante las semanas 1 y 2, así como del calentador 1 posterior al mantenimiento.

Como se observa en la Figura 26, el caudal de ambos calentadores se mantiene relativamente estable a lo largo de los días evaluados, con ligeras variaciones. Sin embargo, el calentador 2 presenta valores consistentemente superiores al calentador 1 en ambas semanas, evidenciando un mejor desempeño hidráulico.

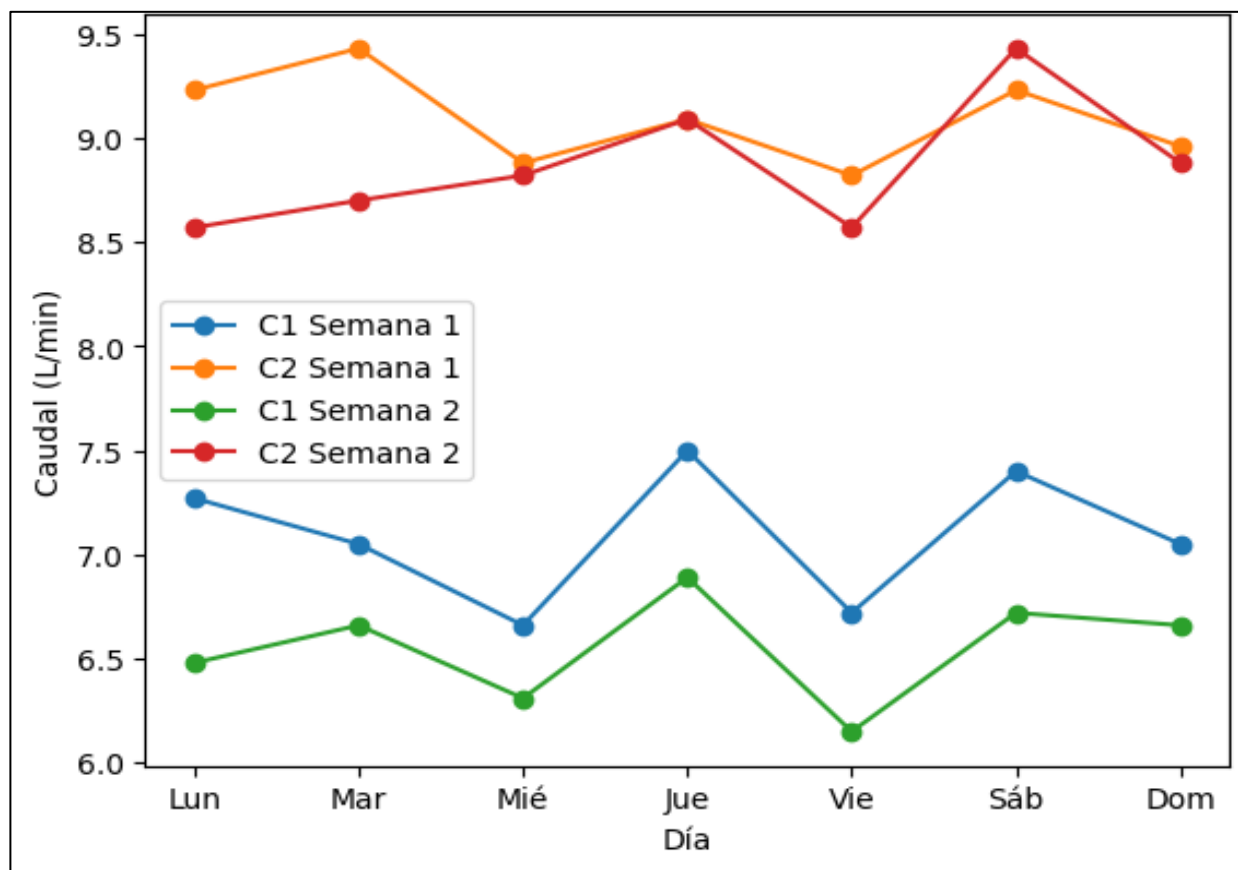


Figura 26. Caudal por día- semana 1 y 2.

En la Figura 27, el calentador 1 presentó un caudal promedio de 7.09 L/min en la semana 1 y 6.55 L/min en la semana 2. Posterior al mantenimiento, se registró una mejora alcanzando un valor de 7.20 L/min, evidenciando una recuperación en el desempeño hidráulico del sistema.

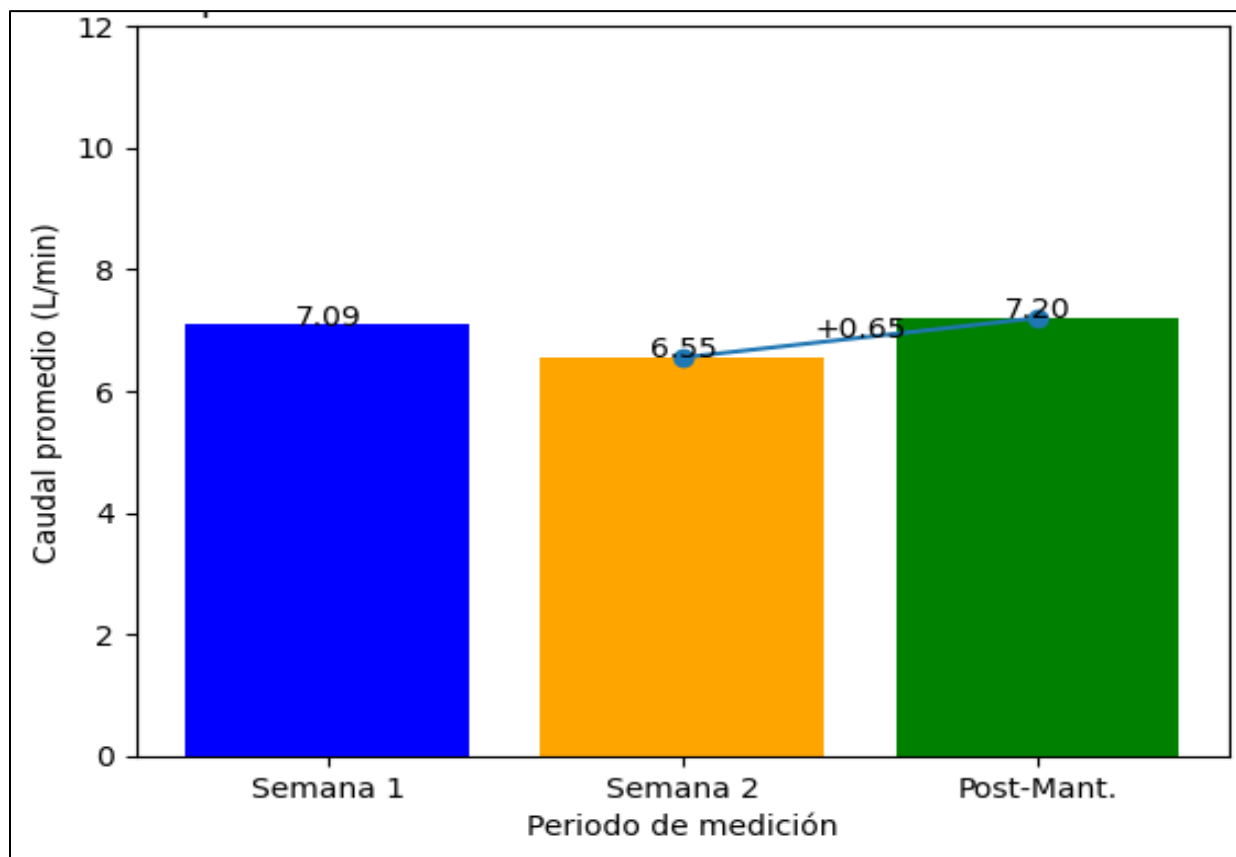


Figura 27. Impacto del mantenimiento en el caudal del Calentador 1.

5.1.3 Diferencia de temperatura (ΔT) como indicador de desempeño térmico

Con el objetivo de evaluar el incremento térmico real generado por los calentadores, se calculó la diferencia de temperatura (ΔT) entre la temperatura de salida y la temperatura de entrada del agua.

El cálculo se realizó mediante la siguiente expresión:

$$\Delta T = T_{\text{out}} - T_{\text{in}}$$

donde:

T_{out} : Temperatura de salida del agua calentada.

T_{in} : Temperatura de entrada del agua proveniente del tinaco.

Como se muestra en la Tabla 19, el calentador 2 presentó incrementos térmicos superiores en todos los horarios evaluados, destacando el periodo de mediodía como el de mayor eficiencia térmica.

Asimismo, al comparar el desempeño del calentador 1 antes y después del mantenimiento, se observa un incremento en los valores de ΔT en los tres horarios de medición, siendo más notable en el periodo de mediodía, lo que evidencia una mejora significativa en la capacidad de calentamiento del sistema.

Tabla 19. Diferencia de temperatura (ΔT) por horario y condición de operación.

Horario	ΔT C1	ΔT C2	ΔT C1 (Post - Mantenimiento)
Mañana	8.428571429	17.7857143	10.4
Mediodía	23.42857143	36.2142857	36.8
Tarde	13.57142857	31.2857143	30.8

Fuente: Elaboración propia.

5.2 Validación de supuestos del ANOVA

Previo a la aplicación del análisis de varianza (ANOVA), se verificaron los supuestos estadísticos necesarios para garantizar la validez del análisis.

En primer lugar, se consideró el supuesto de normalidad de los datos. Debido a que las muestras utilizadas presentan un tamaño considerable ($n = 42$ para las mediciones antes del mantenimiento), y corresponden a variables continuas, se asumió que los datos siguen una distribución aproximadamente normal, de acuerdo con el teorema del límite central.

En segundo lugar, se asumió la homogeneidad de varianzas entre los grupos comparados, condición necesaria para la correcta aplicación del ANOVA de un factor.

Bajo estos criterios, se procedió con la realización del análisis de varianza para evaluar las diferencias entre los grupos estudiados.

5.3 Análisis de varianza (ANOVA)

5.3.1 Comparación de temperatura entre calentadores (C1 vs C2)

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para comparar la temperatura de salida entre el calentador 1 (C1) y el calentador 2 (C2) durante las semanas 1 y 2.

Como se observa en la Figura 28, el calentador 2 presenta valores de temperatura superiores en comparación con el calentador 1 a lo largo del periodo evaluado.

El análisis estadístico mostró diferencias estadísticamente significativas entre ambos sistemas, con un valor de:

Valor F (1,82) = 55.27

valor p = 9.10×10^{-11} ($p < 0.001$).

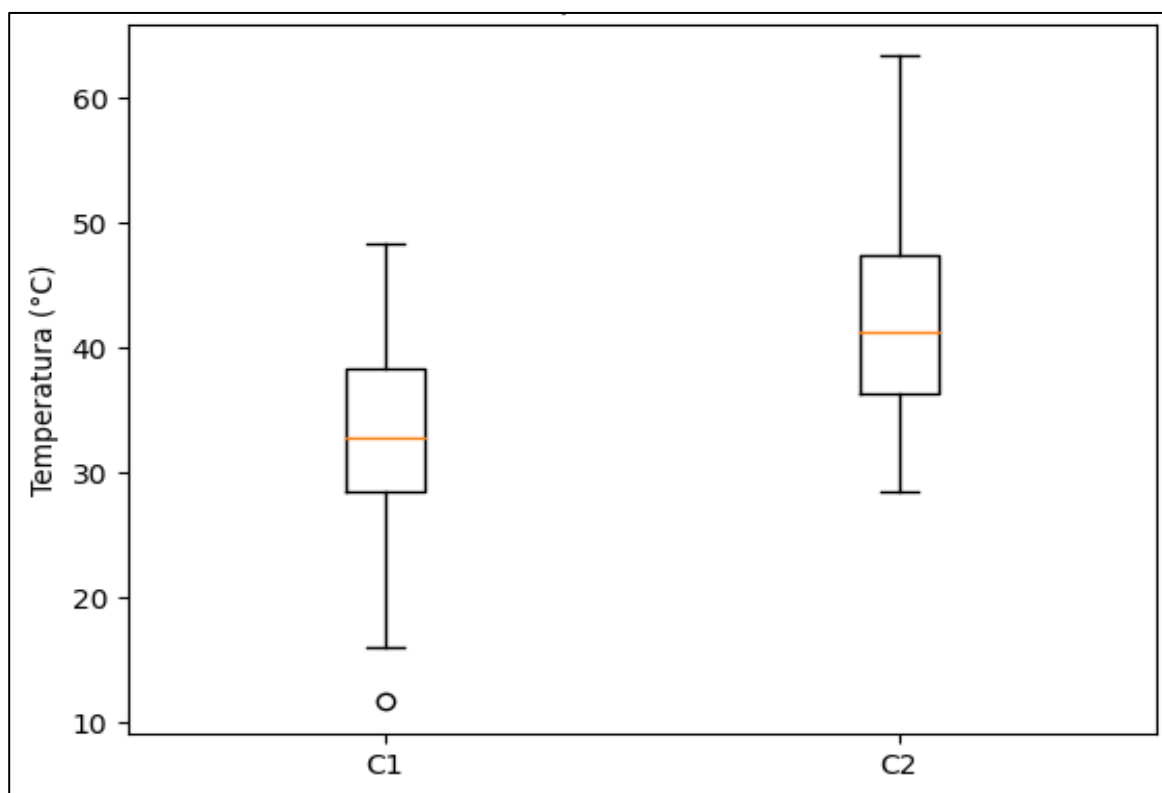


Figura 28. Distribución de la temperatura de salida (Semanas 1–2): C1 vs C2.

Estos resultados confirman que existe una diferencia significativa en el desempeño térmico entre los dos calentadores.

5.3.2 Efecto del mantenimiento en la temperatura (C1 antes vs después)

Para evaluar el impacto del mantenimiento, se realizó un ANOVA comparando la temperatura del calentador 1 antes y después de la intervención. Como se muestra en la Figura 29, se observa un incremento en los valores de temperatura posterior al mantenimiento.

El análisis arrojó los siguientes valores:

Valor $F(1,55) = 16.91$

Valor $p = 0.00013$ ($p < 0.001$)

Indicando diferencias estadísticamente significativas. Determinando que el mantenimiento tuvo un efecto positivo en el desempeño térmico del sistema.

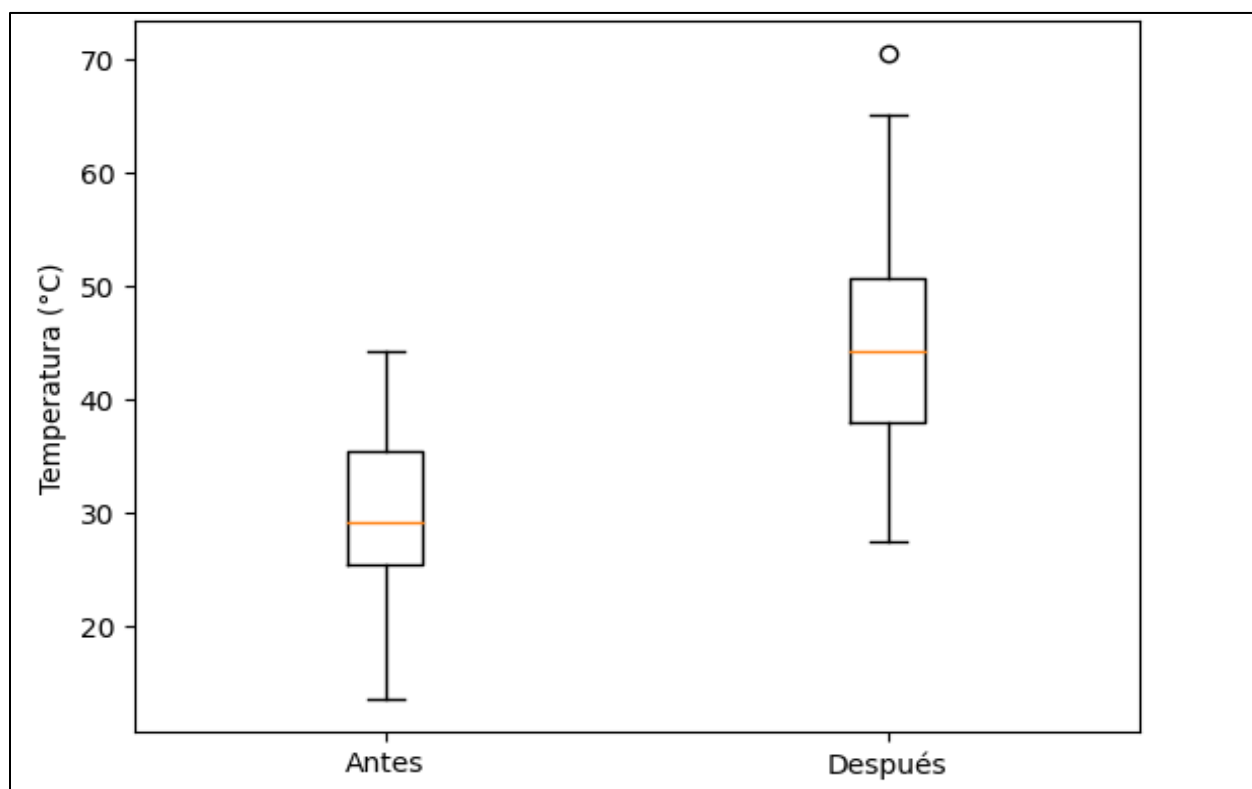


Figura 29. Distribución de temperatura del C1 antes y después del mantenimiento.

5.3.3 Comparación de caudal entre calentadores (C1 vs C2)

Se realizó un análisis de varianza para comparar el caudal entre los calentadores 1 y 2 durante las semanas 1 y 2. Como se observa en la Figura 30, el calentador 2 presenta valores de caudal superiores al calentador 1 de manera consistente.

El análisis mostró diferencias altamente significativas de:

Valor F (1,82) = 1952.22

Valor p = 5.49×10^{-59} ($p < 0.001$).

Esto confirma un mejor desempeño hidráulico del calentador 2.

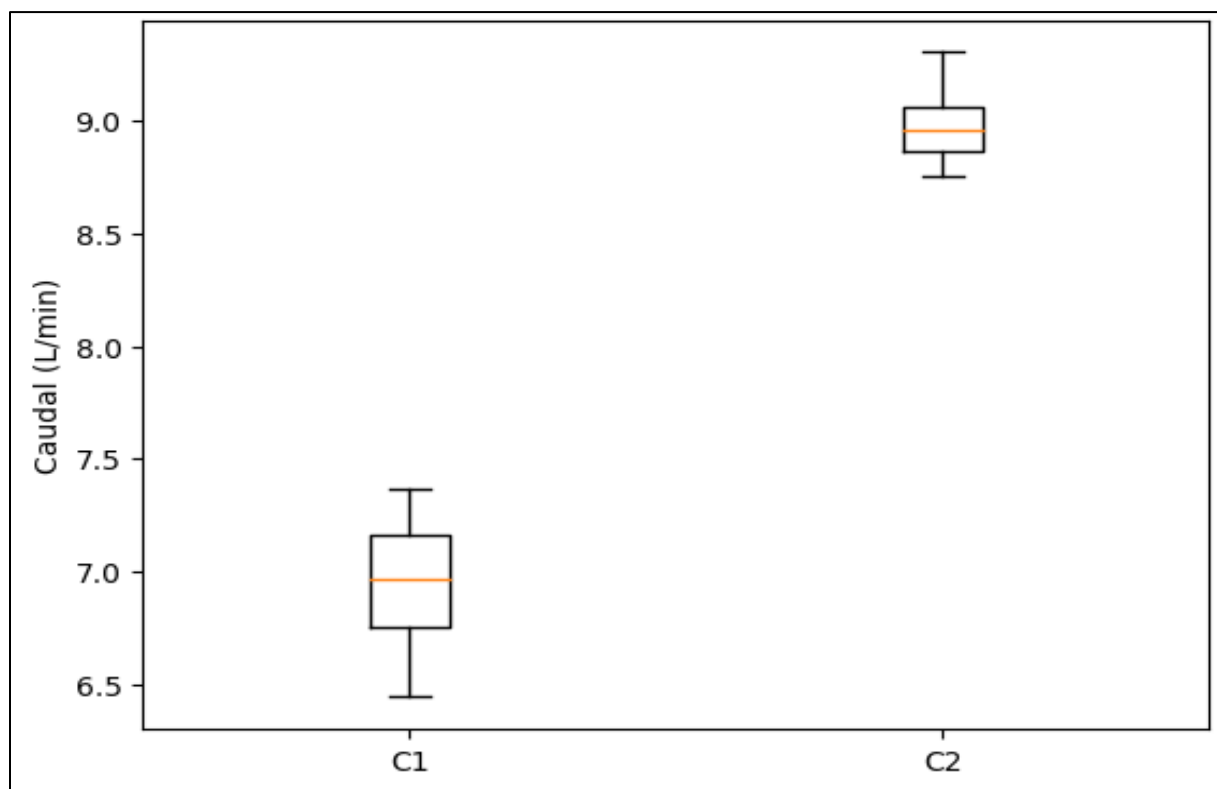


Figura 30. Distribución de caudal (C1 vs C2) en semana 1 y 2.

5.3.4 Efecto del mantenimiento en el caudal (C1 antes vs después)

Finalmente, se evaluó el efecto del mantenimiento sobre el caudal del calentador 1. Como se muestra en la Figura 31, se observa una mejora en el caudal después de la intervención.

El análisis ANOVA arrojó los siguientes valores:

Valor F (1,55) = 25.63

Valor p = 4.95×10^{-6} ($p < 0.001$)

Indicando una diferencia estadísticamente significativa. Estos resultados evidencian una recuperación del desempeño hidráulico del sistema.

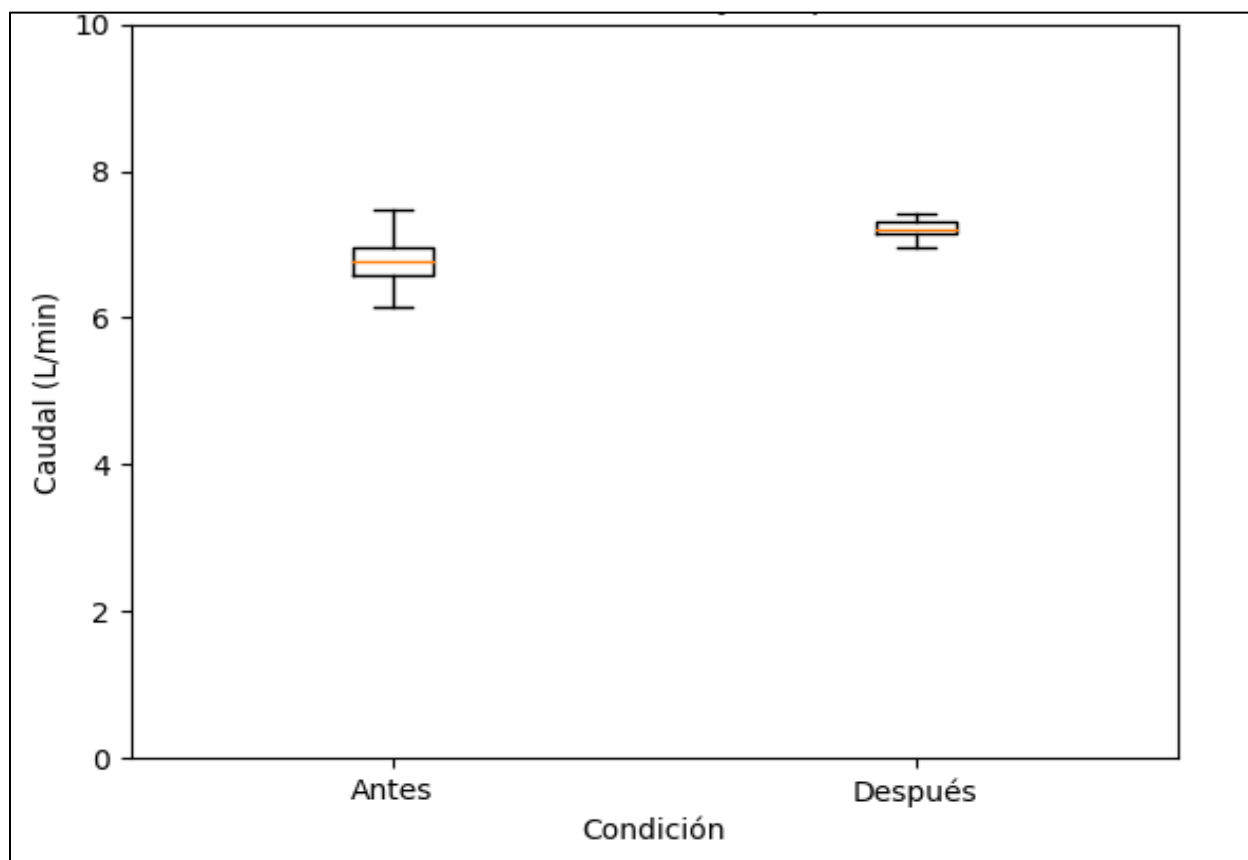


Figura 31. Distribución del caudal de C1 antes y después del mantenimiento

En la Tabla 20 se resumen los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para las variables evaluadas.

Tabla 20. Estadística descriptiva resultados del análisis de varianza (ANOVA)

Variable	Comparación	F	p	Significancia
Temperatura	C1 vs C2	55.27	<0.001	Sí
Temperatura	Antes vs Después	16.91	<0.001	Sí
Caudal	C1 vs C2	1952.22	<0.001	Sí
Caudal	Antes vs Después	25.63	<0.001	Sí

Fuente: Elaboración propia.

5.4 Discusión de resultados

5.4.1 Desempeño térmico de los calentadores

Los resultados obtenidos evidencian diferencias claras en el desempeño térmico entre los sistemas evaluados. El calentador 2 presentó temperaturas de salida superiores en comparación con el calentador 1 durante las semanas 1 y 2, lo cual indica una mayor eficiencia en la captación y transferencia de energía solar.

Este comportamiento puede explicarse a partir de factores físicos asociados al estado del sistema. Diversos estudios han demostrado que la eficiencia de los sistemas solares térmicos depende directamente de la transferencia de calor y del estado de las superficies de intercambio, ya que la presencia de incrustaciones o depósitos actúa como una resistencia térmica que reduce el rendimiento del sistema (Kalogirou, 2004).

Asimismo, la variación de temperatura observada a lo largo del día, con valores máximos en el periodo de mediodía, concuerda con el comportamiento esperado de la radiación solar, la cual

alcanza su punto máximo en este intervalo (Duffie & Beckman, 2013). Esto valida la selección de los horarios de medición empleados en la presente investigación.

5.4.2 Efecto del mantenimiento en el desempeño térmico

Posterior al mantenimiento, el calentador 1 presentó un incremento significativo en la temperatura de salida, acercándose a los valores obtenidos por el calentador 2. Este resultado sugiere una recuperación en la eficiencia térmica del sistema.

Desde el punto de vista físico, este comportamiento puede explicarse por la eliminación de incrustaciones o sedimentos que afectan la transferencia de calor. La literatura establece que la limpieza de los sistemas térmicos reduce las resistencias térmicas y mejora el intercambio de energía (Kalogirou, 2004).

En este sentido, los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado en investigaciones previas, donde se indica que el mantenimiento preventivo permite recuperar el desempeño de los sistemas solares térmicos, mejorando su eficiencia operativa.

5.4.3 Comportamiento hidráulico del sistema (caudal)

En el análisis del caudal, se observó que el calentador 2 presentó valores superiores y más estables en comparación con el calentador 1 durante las semanas evaluadas. Esta diferencia puede atribuirse a la presencia de obstrucciones o pérdidas de presión en el sistema del calentador 1.

De acuerdo con principios de mecánica de fluidos, las obstrucciones en tuberías incrementan las pérdidas de carga, reduciendo el caudal del sistema (Fox et al., 2011). Este comportamiento coincide con lo observado en los resultados previos al mantenimiento.

Posterior a la intervención, se registró una mejora en el caudal del calentador 1, así como una disminución en la variabilidad de los datos, lo que indica una mayor estabilidad del sistema. Este resultado concuerda con lo establecido en la literatura, donde se indica que la eliminación de sedimentos mejora la eficiencia del flujo y reduce pérdidas hidráulicas.

5.4.4 Relación entre condiciones ambientales y factores físicos del sistema

Los resultados obtenidos permiten analizar la influencia de las condiciones ambientales en el desempeño del sistema. Como es esperado, se observó que las temperaturas más altas se registran en el periodo de mediodía, debido a la mayor radiación solar disponible en ese intervalo.

Sin embargo, es importante destacar que, aunque el clima influye en el funcionamiento del sistema, no representa el factor principal que limita su desempeño. Estudios han demostrado que los colectores solares pueden seguir captando energía incluso en condiciones de nubosidad, debido a la radiación difusa presente en la atmósfera (Duffie & Beckman, 2013). No obstante, en condiciones prolongadas de baja radiación, como en invierno o durante periodos continuos de lluvia, la eficiencia del sistema disminuye.

En el presente estudio, ambos calentadores estuvieron expuestos a las mismas condiciones climáticas; sin embargo, presentaron diferencias significativas en su desempeño. Esto indica que el problema no estaba relacionado únicamente con factores ambientales.

La evidencia más relevante se observa en el calentador 1, el cual, después del mantenimiento, mostró una mejora significativa tanto en la temperatura como en el caudal. Esto demuestra que las limitaciones del sistema estaban asociadas principalmente a factores físicos internos, como la acumulación de incrustaciones o la reducción en la eficiencia del intercambio térmico.

Este comportamiento coincide con lo reportado en la literatura, donde se establece que el estado físico del sistema es un factor determinante en su eficiencia operativa (Kalogirou, 2004).

5.4.5 Interpretación estadística de los resultados (ANOVA)

Los resultados del análisis de varianza (ANOVA) confirmaron que las diferencias observadas entre los grupos no son producto del azar. Los valores de p obtenidos ($p < 0.001$) indican que existen diferencias estadísticamente significativas tanto en la temperatura como en el caudal.

En particular, los valores elevados de F , especialmente en el análisis del caudal, indican que la variación entre los grupos es considerablemente mayor que la variación interna de los datos.

Este comportamiento es característico de sistemas que presentan diferencias claras en su desempeño, como se observó entre los calentadores evaluados.

De esta manera, el análisis estadístico respalda los resultados experimentales y confirma la influencia de los factores físicos y del mantenimiento en el desempeño del sistema.

5.4.6 Implicaciones del estudio

Los resultados obtenidos en esta investigación destacan la importancia del mantenimiento preventivo en sistemas solares térmicos, ya que este permite recuperar significativamente el desempeño tanto térmico como hidráulico.

Asimismo, se confirma que, aunque las condiciones ambientales influyen en el funcionamiento del sistema, el estado físico del equipo representa el factor determinante en su eficiencia.

Estos hallazgos pueden ser útiles para optimizar el uso y mantenimiento de calentadores solares domésticos, contribuyendo a mejorar su rendimiento y prolongar su vida útil.

5.5 Impacto económico del mantenimiento aplicado

Además de los resultados técnicos obtenidos en el desempeño térmico y de caudal de los calentadores solares, se evaluó el impacto económico asociado a la estrategia de mantenimiento preventivo aplicada durante la investigación. Dicho mantenimiento se llevó a cabo sin la contratación de un técnico especializado, apoyándose en investigación técnica documentada, y considerando únicamente la adquisición de refacciones menores, específicamente un ánodo de sacrificio y sellos de sellado.

En términos de costos directos, el mantenimiento profesional de calentadores solares de tubos al vacío en el Estado de México presenta un costo promedio que oscila entre \$1,800 y \$2,500 por equipo, considerando mano de obra especializada y materiales. En contraste, el mantenimiento aplicado en esta investigación implicó únicamente la compra de refacciones, con un costo estimado entre \$300 y \$450, lo que representó un ahorro económico directo aproximado de \$1,250 a \$1,950 por equipo.

Adicionalmente, se identificaron ahorros económicos indirectos derivados de la metodología empleada. Entre estos se encuentra la eliminación de costos asociados al diagnóstico

técnico inicial, comúnmente cobrados de manera independiente por servicios especializados, así como la supresión de gastos por traslado y logística del personal externo. Asimismo, la ejecución del mantenimiento dentro del cronograma experimental permitió evitar tiempos muertos y la interrupción del sistema, optimizando el uso de los recursos disponibles.

Estos resultados evidencian que la aplicación de mantenimiento preventivo basado en investigación técnica y documentación especializada no solo contribuyó a la mejora del desempeño del sistema, sino que también representó una alternativa económicamente viable, alineada con los principios de eficiencia, optimización de recursos y mejora continua propios de la Ingeniería Industrial.

5.6 Impacto social

La presente investigación genera un impacto social relevante al demostrar que el mantenimiento preventivo de sistemas de calentamiento solar puede ser realizado de manera accesible, sin la necesidad de recurrir a servicios técnicos especializados.

Esto permite que usuarios domésticos puedan mantener y optimizar el funcionamiento de sus equipos mediante la aplicación de conocimientos básicos y procedimientos documentados, reduciendo costos y facilitando el acceso a tecnologías energéticas eficientes.

Asimismo, el correcto funcionamiento de los calentadores solares contribuye a la disminución en el consumo de combustibles convencionales, lo que se traduce en un ahorro económico para los usuarios y en la reducción del impacto ambiental asociado al uso de energías no renovables.

De esta manera, el estudio no solo aporta beneficios técnicos, sino que también promueve el uso responsable de energías limpias y el aprovechamiento eficiente de los recursos, favoreciendo prácticas sostenibles en el entorno social.

5.7 Impacto académico

El desarrollo de la presente investigación permitió la aplicación práctica de conocimientos adquiridos a lo largo de la formación en Ingeniería Industrial, fortaleciendo competencias clave en el análisis y solución de problemas reales.

Durante el estudio, se aplicaron herramientas estadísticas, particularmente el análisis de varianza (ANOVA), lo que permitió validar de manera objetiva las diferencias entre los sistemas evaluados. Asimismo, se integraron conceptos de transferencia de calor y comportamiento de fluidos, permitiendo comprender el funcionamiento térmico e hidráulico de los calentadores solares bajo condiciones reales de operación.

En el área de mantenimiento, se aplicaron principios de mantenimiento preventivo, identificando fallas asociadas a factores físicos del sistema y evaluando el impacto de su corrección.

De manera general, el proyecto se desarrolló bajo un enfoque de mejora continua (PDCA), lo cual permitió estructurar el análisis, la implementación y la evaluación de resultados de forma ordenada y sistemática.

Las competencias desarrolladas durante la investigación se resumen en la Tabla 21.

Tabla 21. Competencias desarrolladas

Área	Competencia desarrollada
Estadística	Análisis e interpretación de datos mediante ANOVA
Ingeniería térmica	Evaluación del comportamiento de temperatura
Mecánica de fluidos	Análisis del caudal y flujo del sistema
Mantenimiento	Identificación de fallas y aplicación de mantenimiento preventivo
Investigación	Desarrollo metodológico y análisis experimental
Mejora continua	Enfoque estructurado para solución de problemas

Fuente: Elaboración propia 2025.

Capítulo

VI

6.1 Conclusión

La presente investigación permitió evaluar el desempeño real de dos calentadores solares de tubos al vacío bajo condiciones climáticas propias del municipio de Santiago Tianguistenco, Estado de México, mediante un enfoque experimental y el uso de herramientas de mejora continua basadas en el ciclo Plan–Do–Check–Act (PDCA).

Las mediciones se realizaron en instalaciones ubicadas dentro de la misma zona geográfica, bajo condiciones climáticas equivalentes a las de la institución de estudio, con el fin de garantizar la representatividad de los resultados obtenidos.

A partir del análisis de los resultados registrados durante las dos primeras semanas de medición, se identificaron diferencias consistentes en el comportamiento térmico y en el caudal entre ambos equipos, observándose un desempeño más estable en el Calentador 2, mientras que el Calentador 1 presentó mayores pérdidas térmicas y una menor estabilidad en el flujo, atribuibles principalmente a su estado operativo y antigüedad.

Posteriormente, la aplicación de mantenimiento preventivo al Calentador 1 permitió evidenciar una mejora significativa en su desempeño durante la Semana 3, reflejada en un incremento en la temperatura de salida, particularmente en la toma de mediodía, así como en una mayor estabilidad del caudal. Este comportamiento confirma la efectividad de la intervención realizada como acción de mejora dentro del enfoque metodológico aplicado.

En relación con la temperatura de entrada del agua, se observó que esta se mantuvo dentro de rangos similares durante las semanas de estudio, lo cual permitió establecer que las variaciones en el desempeño térmico no estuvieron determinadas principalmente por esta variable, sino por las condiciones propias del sistema.

De manera general, los resultados obtenidos permiten concluir que, si bien las condiciones climáticas influyen en el comportamiento térmico de los calentadores solares, el estado operativo del sistema y la aplicación de mantenimiento preventivo representan el factor predominante en el desempeño global del equipo. Esta relación se evidenció al comparar periodos con condiciones ambientales similares antes y después de la intervención, donde la mejora en el rendimiento fue claramente observable.

Desde la perspectiva de la Ingeniería Industrial, la aplicación del ciclo PDCA permitió estructurar de manera sistemática el proceso de análisis, facilitando la identificación del problema, la implementación de acciones correctivas y la validación de los resultados mediante datos experimentales. Este enfoque demuestra la importancia de integrar metodologías de mejora continua en el estudio y optimización de sistemas energéticos reales.

En el ámbito económico, se concluye que el mantenimiento preventivo aplicado representa una alternativa viable y eficiente, al permitir mejorar el desempeño del sistema con una inversión mínima en comparación con los costos de mantenimiento especializado, sin comprometer la calidad de los resultados obtenidos.

Por lo tanto, esta investigación aporta evidencia técnica local que contribuye a la comprensión del comportamiento real de los calentadores solares en regiones con alta variabilidad climática, destacando la importancia del mantenimiento preventivo como estrategia clave para garantizar la eficiencia, estabilidad y confiabilidad de estos sistemas en el tiempo.

6.2 Recomendaciones técnicas

1. Mantenimiento preventivo del sistema

Se recomienda implementar un programa de mantenimiento preventivo cada 6 a 12 meses para evitar disminución del rendimiento térmico y reducción del caudal, incluyendo limpieza interna, revisión de empaques, drenado parcial y verificación de componentes críticos (Get Green, 2023; Cercalux, 2024).

2. Instalación adecuada y conservación de condiciones físicas

Se recomienda asegurar orientación, inclinación y fijación correctas del sistema, así como mantener en buen estado el aislamiento del termotanque y las conexiones, ya que condiciones de nubosidad parcial y viento moderado incrementan las pérdidas térmicas en equipos deteriorados (Meteoblue, 2025).

3. Considerar el tiempo de ducha y el consumo de agua

Es recomendable considerar que duchas prolongadas incrementan el gasto de agua y pueden superar la capacidad de recuperación térmica del sistema, especialmente en regiones frías donde el calentador opera con menor margen térmico.

4. Selección del calentador según tipo de uso y número de usuarios

Se recomienda seleccionar el número de tubos y la capacidad del termotanque conforme al tamaño de la familia y el tipo de baño (regadera continua o uso con botes), ya que la demanda térmica real depende directamente del volumen utilizado y del patrón de consumo.

6.3 Propuestas de mejora y trabajos futuros

Como propuesta de mejora técnica, se recomienda optimizar el sistema mediante la implementación de un mecanismo de recirculación, el cual permite conservar el agua caliente dentro del circuito, reduciendo el desperdicio durante el arranque del flujo y mejorando el aprovechamiento del recurso hídrico.

Asimismo, se propone la integración del sistema con un calentador auxiliar (boiler) como respaldo en condiciones climáticas desfavorables. Esta configuración híbrida permite elevar la temperatura final con un menor consumo energético, al aprovechar el precalentamiento generado por el sistema solar.

También, se recomienda que futuros trabajos consideren variables relacionadas con el comportamiento del usuario, como el tiempo de uso, el tipo de consumo y el número de integrantes por vivienda. Estos factores influyen directamente en la demanda de agua caliente y en la selección adecuada del sistema.

Y, por último, esta investigación puede servir como línea base para estudios posteriores, tales como la comparación entre equipos nuevos y equipos con mayor antigüedad, el análisis del impacto del mantenimiento en distintos intervalos de tiempo, o la integración de sistemas solares con otras tecnologías de eficiencia energética, con el fin de fortalecer estrategias de ahorro y confiabilidad en contextos reales.

Referencias

- (CONAGUA), C. N. (2023). *Informe climatológico anual: Estado de México 2023*. Gobierno de México.
- (DOF), D. O. (2018). *NOM-027-ENER/SCFI-2018: Eficiencia térmica y etiquetado de calentadores solares de agua*. Secretaría de Economía.
- (IEA), I. E. (2023). *Solar Heat Worldwide 2023: Global Market Development and Trends in 2022*. IEA Solar Heating and Cooling Programme.
- (INEGI), I. N. (2023). *Estadísticas sobre consumo energético residencial en México 2023*. Gobierno de México.
- (ISO)., I. O. (2017). *ISO 9806:2017 – Solar energy — Solar thermal collectors — Test methods*. ISO.
- (SENER)., S. d. (2022). *strategia Nacional de Energía 2022–2030*. Gobierno de México.
- arcía-Márquez, D. &. (2021). *Evaluación del desempeño térmico de colectores solares de tubos al vacío en climas templados*. *Revista de Energías Renovables y Medio Ambiente*, 12(2), 45–58.
- Deming, W. E. (2020). *The New Economics for Industry, Government, Education (3rd ed.)*. MIT Press.
- Duffie, J. A. (2020). *Solar Engineering of Thermal Processes (5th ed.)*. Wiley.
- Evans, J. R. (2021). *Administración y control de la calidad (11.^a ed.)*. Cengage Learning.
- Group., V. (2023). *Solar System Maintenance Guide: Procedures for evacuated tube collectors*. Viessmann.
- Hernández-Gómez, L. P. (2022). *Análisis experimental de la eficiencia de calentadores solares domésticos en zonas de radiación variable*. *Ingeniería Energética*, 43(1), 67–79.
- Imai, M. (2021). *Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success (Revised ed.)*. McGraw-Hill.
- Kalogirou, S. A. (2021). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems (3rd ed.)*. Academic Press.

- López-Núñez, A. (2023). *Mantenimiento correctivo en sistemas solares domésticos: análisis de fallas y protocolos de intervención*. *Revista de Innovación Energética*, 9(2), 34–45.
- Martínez, J. T. (2023). *Impacto económico y social de la adopción de calentadores solares en hogares mexicanos*. *Revista Mexicana de Energía Sustentable*, 9(1), 22–34.
- Mendoza, F. O. (2022). *Desempeño comparativo de colectores solares planos y de tubos al vacío en aplicaciones domésticas*. *Energía y Desarrollo Sustentable*, 18(4), 51–60.
- Montgomery, D. C. (2021). *Design and Analysis of Experiments (10th ed.)*. Wiley.
- Pourbafrani, M. (2024). *Thermal decay and performance loss in aged evacuated tube collectors*. *Journal of Sustainable Thermal Technologies*, 12(1), 33–48.
- Solar, C. (2022). *Manual técnico de mantenimiento de sistemas termosifón solar*. Calcara Solar.
- Womack, J. P. (2020). *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation (3rd ed.)*. Simon & Schuster.
- Zhou, Y. L. (2021). *Performance degradation of vacuum tube solar collectors under long-term operation*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 233, 111395.