

Evaluation of the Thermal Performance of a Solar Heating System with Sensible Heat Storage in Water and Automatic Control

Jose Manuel Ramos Cutipa¹; Leonidas Vilca Callata²; Carlos Alberto Verano Galindo³; Walter Oswaldo Paredes Pareja⁴

^{1,4}First and Fourth Author's Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú, jramos@unap.edu.pe, lvilca@unap.edu.pe,
cverano@unap.edu.pe, walterparedes@unap.edu.pe

Abstract. *Las zonas altoandinas presentan una marcada diferencia entre la disponibilidad de radiación solar durante el día y la demanda de calefacción en horas nocturnas, lo que exige sistemas capaces de almacenar energía térmica y gestionarla de forma eficiente. En este trabajo se evalúa el desempeño térmico de un sistema de calefacción solar basado en acumulación térmica sensible en un tanque de agua, distribución mediante radiadores hidráulicos y control automático del caudal, incorporando un calefactor eléctrico auxiliar condicionado. El análisis considera una operación continua de siete días con resolución temporal de 60 s, empleando perfiles representativos de irradiancia solar y temperatura exterior para la región de Puno. El sistema incluye colectores solares de 6 m², un tanque de almacenamiento de 150 L y un recinto modelado mediante balances energéticos concentrados. El objetivo del sistema de control es mantener una temperatura interior de 21 °C durante el periodo de mayor demanda térmica (18:00–23:00), priorizando el uso de la energía solar almacenada y limitando el consumo auxiliar. Los resultados muestran que el sistema mantiene la temperatura interior dentro del rango de confort térmico (20–22 °C) durante el 91,36 % del periodo nocturno evaluado, con un error cuadrático medio de 1,67 °C respecto al setpoint y un consumo auxiliar semanal de 52,18 kWh. Se discuten implicaciones de diseño relacionadas con el volumen de almacenamiento, las pérdidas térmicas del recinto y la capacidad de emisión de los radiadores, aportando criterios prácticos para la implementación de sistemas de calefacción solar en viviendas altoandinas.*

Keywords. *heating, solar, storage, thermal, control.*

Evaluación del desempeño térmico de un sistema de calefacción solar con acumulación sensible en agua y control automático

Jose Manuel Ramos Cutipa¹; Leonidas Vilca Callata²; Carlos Alberto Verano Galindo³; Walter Oswaldo Paredes Pareja⁴

^{1,4}First and Fourth Author's Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú, jramos@unap.edu.pe, lvilca@unap.edu.pe, cverano@unap.edu.pe, walterparedes@unap.edu.pe

Resumen. Las zonas altoandinas presentan una marcada diferencia entre la disponibilidad de radiación solar durante el día y la demanda de calefacción en horas nocturnas, lo que exige sistemas capaces de almacenar energía térmica y gestionarla de forma eficiente. En este trabajo se evalúa el desempeño térmico de un sistema de calefacción solar basado en acumulación térmica sensible en un tanque de agua, distribución mediante radiadores hidráulicos y control automático del caudal, incorporando un calefactor eléctrico auxiliar condicionado. El análisis considera una operación continua de siete días con resolución temporal de 60 s, empleando perfiles representativos de irradiancia solar y temperatura exterior para la región de Puno. El sistema incluye colectores solares de 6 m², un tanque de almacenamiento de 150 L y un recinto modelado mediante balances energéticos concentrados. El objetivo del sistema de control es mantener una temperatura interior de 21 °C durante el periodo de mayor demanda térmica (18:00–23:00), priorizando el uso de la energía solar almacenada y limitando el consumo auxiliar. Los resultados muestran que el sistema mantiene la temperatura interior dentro del rango de confort térmico (20–22 °C) durante el 91,36 % del periodo nocturno evaluado, con un error cuadrático medio de 1,67 °C respecto al setpoint y un consumo auxiliar semanal de 52,18 kWh. Se discuten implicaciones de diseño relacionadas con el volumen de almacenamiento, las pérdidas térmicas del recinto y la capacidad de emisión de los radiadores, aportando criterios prácticos para la implementación de sistemas de calefacción solar en viviendas altoandinas.

Palabras clave: calefacción, solar, acumulación, térmica, control.

I. INTRODUCCIÓN

Las regiones altoandinas se caracterizan por una dinámica térmica diaria exigente, donde la elevada radiación solar disponible durante el día contrasta con descensos pronunciados de temperatura durante la noche. Esta condición convierte a la energía solar térmica en una alternativa atractiva para calefacción residencial, pero introduce el desafío de desacoplar temporalmente la captación y el uso del calor disponible [1], [2].

El almacenamiento térmico sensible en agua es una de las soluciones más difundidas en sistemas de calefacción solar, debido a su simplicidad, fiabilidad operativa y compatibilidad con circuitos de distribución hidráulica [3], [4]. Estudios recientes confirman que los tanques de agua continúan siendo

competitivos frente a otras tecnologías cuando se consideran criterios de costo, durabilidad y facilidad de integración [5], [6].

No obstante, el desempeño global de un sistema de calefacción solar no depende únicamente del volumen de almacenamiento. Factores como las pérdidas térmicas del recinto, la capacidad de los emisores de calor y, especialmente, la estrategia de control aplicada influyen de manera decisiva en la estabilidad térmica interior y en el consumo de energía auxiliar [7], [8]. En climas fríos, un control inadecuado puede conducir a déficits térmicos nocturnos incluso cuando existe energía almacenada suficiente [9].

Diversos trabajos han mostrado que la regulación continua del caudal en sistemas hidráulicos, combinada con una activación racional de un calefactor eléctrico auxiliar, permite mejorar la estabilidad térmica y reducir el consumo energético frente a esquemas de control ON/OFF [10], [11]. En el contexto altoandino, estas estrategias adquieren particular relevancia debido a las condiciones climáticas severas y a la necesidad de soluciones energéticamente eficientes [12].

En este marco, el presente trabajo evalúa el desempeño térmico de un sistema de calefacción solar con acumulación sensible en agua y control automático, utilizando indicadores de confort térmico y consumo auxiliar como criterios principales de análisis.

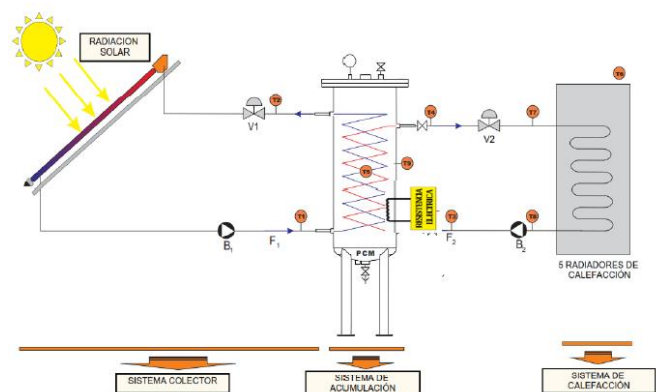


Fig. 1. Esquema del sistema de calefacción solar con acumulación en agua, radiadores y control automático.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Arquitectura del sistema

El sistema evaluado se compone de tres subsistemas principales, cuyo esquema general se muestra en la Fig. 1. El primero corresponde a un subsistema de captación solar térmica mediante colectores solares planos. El segundo está constituido por un tanque de almacenamiento de agua que actúa como acumulador de energía térmica sensible, incorporando un intercambiador interno. Finalmente, un circuito secundario distribuye el calor hacia radiadores hidráulicos, con caudal regulable y un calefactor eléctrico auxiliar como respaldo.

Configuraciones de este tipo han sido ampliamente documentadas para aplicaciones de calefacción solar en climas fríos y templados [10], [11].

El subsistema solar térmico está compuesto por colectores solares planos con un área total de captación de 6 m², configurados para aplicaciones residenciales de calefacción en clima frío altoandino. Los colectores fueron considerados con orientación óptima hacia el ecuador y una eficiencia térmica global promedio de 0.55, valor representativo para sistemas solares térmicos de baja temperatura reportados en la literatura especializada.

B. Escenario climático y condiciones de operación

La evaluación se realiza para un horizonte de siete días consecutivos con un paso temporal de 60 s. Los perfiles de irradiancia solar y temperatura exterior empleados reproducen condiciones representativas de la región de Puno, caracterizadas por una ventana diaria de radiación solar entre las 08:00 y 16:00 h y temperaturas nocturnas bajas.

Estos perfiles se basan en información reportada para zonas altoandinas [12] y en bases de datos meteorológicos ampliamente utilizadas en estudios energéticos, como NASA POWER y registros del SENAMHI [13], [14]. Las condiciones de entrada se muestran en la Fig. 2.

TABLA I
PARÁMETROS DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN SOLAR CONSIDERANDO
(CASO BASE)

Subsistema	Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Tanque de almacenamiento	Volumen de agua	V	150	L
	Masa de agua	m	150	kg
	Calor específico del agua	C _p	4180	J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹
	Capacidad térmica	C _{tank}	6.27 × 10 ⁵	J·°C ⁻¹
	Coefficiente global de pérdidas	U _{Atank}	6	W·°C ⁻¹
	Temperatura inicial del tanque	T _{tanque,0}	45	°C
Colectores solares	Área total de captación	A _c	6	m ²
	Eficiencia térmica global	η	0.55	—
Recinto calefaccionado	Capacidad térmica equivalente	C _{room}	2.5 × 10 ⁶	J·°C ⁻¹

	Coefficiente global de pérdidas	U _{Aroom}	220	W·°C ⁻¹
	Temperatura inicial interior	T _{room,0}	16	°C
Radiadores	Coefficiente agregado de transferencia	K _{rad}	1.4 × 10 ⁵	—
	Caudal máximo del circuito	F _{2,max}	2.0 × 10 ⁻⁴	m ³ ·s ⁻¹
calefactor eléctrico auxiliar	Potencia máxima	P _{max}	9000	W
Control	Setpoint térmico	T _{set}	21	°C

El horizonte temporal de simulación se fijó en una semana completa, con el objetivo de capturar no solo la dinámica diaria de carga y descarga del sistema, sino también la acumulación de efectos térmicos entre días consecutivos. Este enfoque permite evaluar la estabilidad del control y la evolución del estado energético del tanque ante ciclos repetidos de captación solar y demanda nocturna.

El paso temporal de 60 s se seleccionó como un compromiso entre resolución y costo computacional. Este valor es suficientemente pequeño para representar adecuadamente la dinámica del control, la activación del calefactor auxiliar y las variaciones de temperatura del tanque y del recinto, sin introducir errores numéricos significativos ni tiempos de simulación excesivos.

La selección de parámetros del modelo se realizó considerando valores típicos reportados en la literatura para sistemas de calefacción solar con radiadores, ajustados a un contexto de clima frío altoandino. De este modo, el escenario simulado busca reflejar condiciones realistas de operación, manteniendo un nivel de complejidad acorde con los objetivos del estudio.

C. Modelos térmicos

El comportamiento térmico del sistema se analizó mediante balances de energía concentrados aplicados al tanque de almacenamiento y al recinto calefaccionado. En ambos casos, se consideró la conservación de energía entre los flujos térmicos entrantes, las pérdidas térmicas y la energía transferida al sistema de calefacción, permitiendo representar la dinámica térmica global del sistema durante el periodo de simulación.

El tanque de almacenamiento se modela como un volumen perfectamente mezclado. El balance energético se expresa como:

$$C_{tanque} \frac{dT_{tanque}}{dt} = Q_{solar}(t) + P_{aux}(t) - Q_{rad}(t) - U_{Atanque}(T_{tanque} - T_a) \quad (1)$$

donde la potencia solar útil se calcula mediante:

$$Q_{solar}(t) = \eta A_c G(t) \quad (2)$$

Este enfoque es consistente con modelos utilizados en el análisis de tanques solares y en el diagnóstico energético de sistemas térmicos [6], [15].

El recinto se representa mediante un modelo térmico concentrado de primer orden:

$$C_{amb} \frac{dT_{amb}}{dt} = Q_{rad}(t) - UA_{amb}(T_{amb} - T_a) \quad (3)$$

Modelos de este tipo han sido ampliamente empleados para analizar estabilidad térmica y confort en edificaciones residenciales.

La potencia térmica entregada al recinto se modela como:

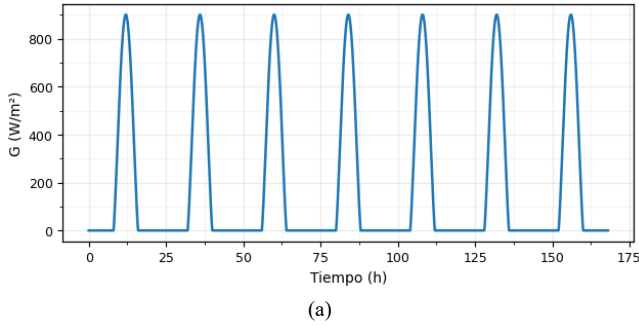
$$Q_{rad}(t) = K_{rad} F_2(t) \max(0, T_{tanque} - T_{amb}) \quad (4)$$

Esta formulación captura el efecto combinado del caudal y del salto térmico, y es coherente con estudios sobre el comportamiento térmico de radiadores bajo condiciones de caudal variable [16], [17].

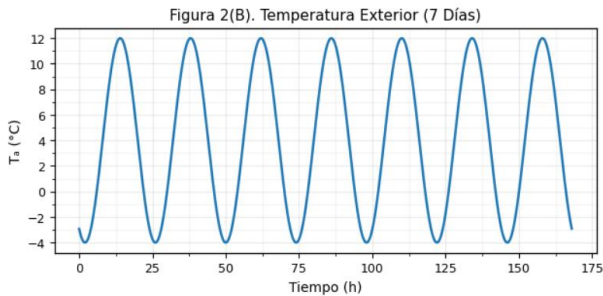
D. Estrategia de control

El objetivo del sistema de control es mantener la temperatura interior cercana a un setpoint de 21 °C durante el periodo de mayor demanda (18:00–23:00). El caudal del circuito calefactor se regula mediante un control proporcional saturado:

$$F_2(t) = \text{sat}(K_p(T_{set} - T_{amb}), 0, F_{2,max}) \quad (5)$$



(a)



(b)

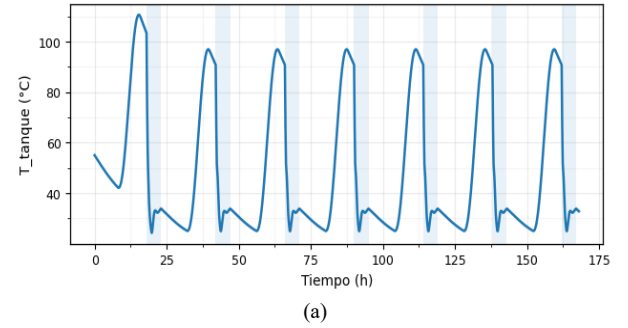
Fig. 2. Perfiles climáticos utilizados: (a) irradiancia solar $G(t)$; (b) temperatura exterior $T_a(t)$.

El calefactor eléctrico auxiliar se activa únicamente cuando el error térmico persiste y la energía almacenada o la capacidad de entrega resultan insuficientes. Estrategias de este tipo han demostrado mejoras en estabilidad térmica y eficiencia energética [7], [8], [18].

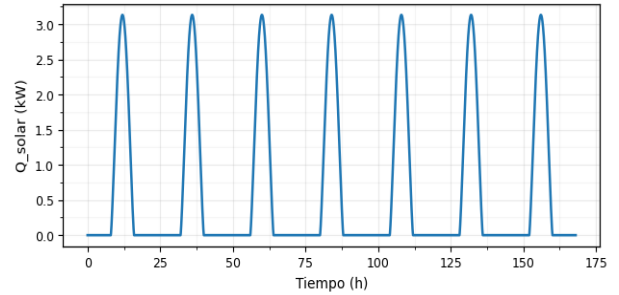
E. Parámetros del sistema

Los parámetros utilizados en el caso de estudio se presentan en la Tabla I, seleccionados para representar un escenario realista de aplicación residencial en zonas altoandinas, en concordancia con la literatura especializada [1], [3], [10], [12].

El tanque de almacenamiento térmico fue modelado como un depósito de agua térmicamente aislado mediante una capa equivalente de poliuretano expandido, representada a través de un coeficiente global de pérdidas térmicas de $6 \text{ W} \cdot \text{°C}^{-1}$. Esta aproximación permite representar condiciones realistas de almacenamiento sensible utilizadas en sistemas de calefacción solar residencial.



(a)



(b)

Fig. 3. Evolución temporal de la temperatura del tanque y de la potencia solar útil durante la semana analizada

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Comportamiento térmico del tanque

La evolución de la temperatura del tanque y de la potencia solar útil se muestra en la Fig. 3. Durante los periodos diurnos, el tanque incrementa progresivamente su temperatura, almacenando energía térmica que posteriormente se utiliza durante la noche. En el periodo de calefacción, el tanque

experimenta una descarga gradual controlada por la potencia entregada a los radiadores y las pérdidas térmicas.

Este comportamiento es consistente con lo reportado para sistemas de calefacción solar con almacenamiento sensible en climas fríos [11], [12].

B. Temperatura interior y confort térmico

La Fig. 4 presenta la temperatura interior del recinto comparada con el setpoint de 21 °C. El sistema mantiene la temperatura dentro del rango de confort térmico (20–22 °C) durante el 91,36 % del periodo nocturno evaluado, con un error cuadrático medio de 1,67 °C.

La evaluación del confort se realiza conforme a criterios ampliamente aceptados y a normas internacionales como ASHRAE 55 e ISO 7730 [19]–[21].

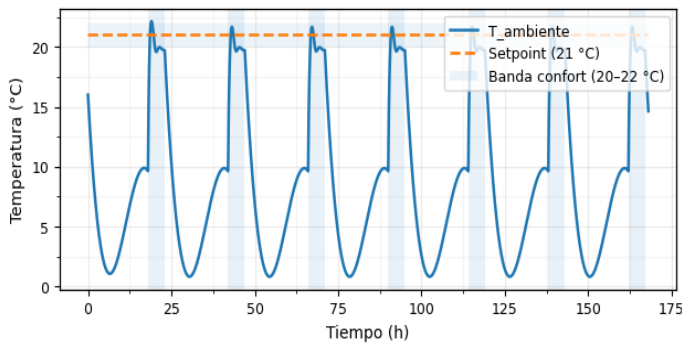


Fig. 4. Temperatura interior del recinto y setpoint durante el periodo nocturno.

C. Respuesta del sistema de control

Las señales de control correspondientes al caudal del circuito calefactor y a la potencia del calefactor eléctrico auxiliar se muestran en la Fig. 5. El caudal se incrementa progresivamente en los periodos de mayor demanda, mientras que el calefactor eléctrico auxiliar se activa de forma puntual, evitando un consumo innecesario de energía auxiliar. Las áreas sombreadas en color celeste indican el periodo diario de operación del sistema de calefacción (18:00–23:00 h), durante el cual se activa el control del caudal del circuito calefactor y, de ser necesario, el sistema auxiliar.

Este comportamiento concuerda con estrategias reportadas en la literatura para sistemas solares asistidos [8], [18].

Los principales indicadores de desempeño térmico del sistema se resumen en la Tabla II, donde se destaca el elevado porcentaje de tiempo en confort y el consumo auxiliar moderado.

D. Análisis de sensibilidad de parámetros clave

Con el fin de evaluar la robustez del sistema de calefacción solar propuesto frente a variaciones en los parámetros de diseño y operación, se realizó un análisis de sensibilidad cualitativo centrado en aquellas variables que influyen de manera más directa en el desempeño térmico durante el periodo nocturno.

En particular, se analizó el efecto del volumen del tanque de acumulación, el coeficiente global de pérdidas térmicas del tanque (UA_{tanque}) y el valor máximo del caudal del circuito calefactor ($F2_{\text{max}}$).

TABLA II
INDICADORES DE DESEMPEÑO TÉRMICO DEL SISTEMA (SIMULACIÓN SEMANAL)

Indicador	Valor
Horizonte de simulación	7 días
Paso temporal	60 s
Tiempo en rango de confort (20–22 °C)	91.36 %
Error cuadrático medio respecto al setpoint	1.67 °C
Energía solar útil captada	124.5 kWh
Energía eléctrica auxiliar consumida	52.18 kWh
Temperatura mínima del tanque	38.4 °C
Oscilación pico a pico de la temperatura interior	2.3 °C

A partir de los resultados de simulación, se estimó que la demanda térmica total del recinto durante la semana evaluada estuvo compuesta por la energía suministrada por el sistema solar y el consumo auxiliar eléctrico. Considerando una energía solar útil captada de 124.5 kWh y un consumo auxiliar de 52.18 kWh, la demanda térmica total aproximada del sistema fue de 176.68 kWh durante el horizonte de simulación. Esto indica que aproximadamente el 70.5 % de la energía requerida para calefacción fue cubierta mediante energía solar térmica almacenada, mientras que el sistema auxiliar aportó el 29.5 % restante durante condiciones críticas de operación nocturna.

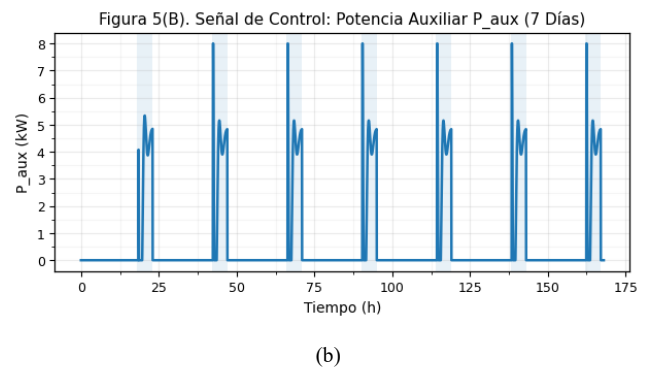
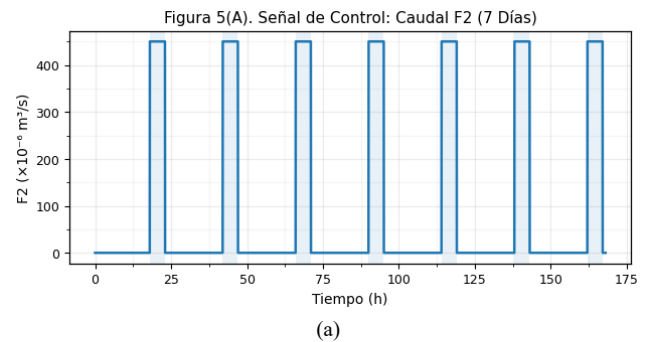


Fig. 5. Señales de control: (a) caudal del circuito calefactor; (b) potencia del sistema auxiliar de calefacción.

El volumen del tanque condiciona la cantidad de energía sensible disponible para cubrir la demanda de calefacción. Cuando se consideran volúmenes reducidos, del orden de 100 L, se observa una disminución del tiempo durante el cual el sistema es capaz de mantener la temperatura interior cercana al setpoint, especialmente en noches con temperaturas exteriores más bajas. Por el contrario, un aumento en la capacidad del tanque mejora la inercia térmica, pero requiere periodos de carga y radiación solar más amplios. En cuanto a las pérdidas de calor, el coeficiente UA del tanque es determinante para mantener la temperatura del agua; si este valor es elevado, el enfriamiento nocturno se acelera, lo que ocasiona el incremento del gasto de energía eléctrica. Por tanto, minimizar estas pérdidas mediante un buen aislamiento es esencial para optimizar el rendimiento del sistema.

TABLA III
RANGOS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN SOLAR

Variable	Símbolo	Rango de operación	Unidad
Irradiancia solar	$G(t)$	0 – 1000	W/m ²
Temperatura exterior	T_a	–5 – 15	°C
Temperatura del tanque	T_{tanque}	30 – 80	°C
Temperatura interior	T_{room}	16 – 22	°C
Caudal del circuito calefactor	F_2	0 – $F_{2,max}$	m ³ /s
Potencia solar útil	Q_{solar}	0 – 3.3	kW
Potencia auxiliar eléctrica	P_{aux}	0 – 9.0	kW

Asimismo, el valor máximo del flujo en el circuito de calefacción (F_{2_max}) determina la cantidad de calor que puede transferirse instantáneamente hacia el espacio interior. Aun cuando el depósito contenga energía térmica suficiente, un flujo reducido puede obstaculizar el logro o mantenimiento de la temperatura de confort deseada. Por el contrario, flujos demasiado elevados pueden generar fluctuaciones bruscas de temperatura, comprometiendo la estabilidad del sistema de regulación. Este balance demuestra la importancia de seleccionar apropiadamente los equipos hidráulicos y calibrar meticulosamente los parámetros de regulación. Por ello, el estudio de sensibilidad revela que el rendimiento del sistema no está determinado exclusivamente por la radiación solar disponible, sino por una coordinación armónica entre la capacidad del tanque de acumulación, las fugas de calor y la aptitud para suministrar energía térmica al espacio climatizado.

Aunque el modelo construido posibilita evaluar de forma coherente el comportamiento térmico del sistema de calefacción solar planteado y la efectividad de las estrategias de regulación, resulta necesario identificar ciertas restricciones propias de los modelos del método utilizado. Primeramente, el depósito de almacenamiento y el espacio a calefaccionar se modelan mediante aproximaciones de parámetros concentrados (lumped models), lo cual supone considerar una distribución de temperatura homogénea en cada uno de estos volúmenes.

TABLA IV
COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA BAJO
ESCENARIOS CLIMÁTICOS

Indicador	Día despejado	Día crítico
Irradiancia solar máxima	Alta	Moderada–baja
Temperatura exterior mínima	–2 °C	–6 °C
Temperatura máxima del tanque	Alta (≈ 75 – 80 °C)	Media (≈ 60 – 65 °C)
Tiempo en banda de confort (20–22 °C)	Alto	Moderado
Uso del calefactor auxiliar	Bajo	Moderado
Estabilidad térmica interior	Alta	Media
Cumplimiento del setpoint	Satisfactorio	Parcial

Si bien este enfoque es válido para investigaciones de comparación de desempeño y estudios de regulación, sin embargo, no representa los procesos de separación térmica por capas en el depósito ni las variaciones de temperatura en distintas zonas del espacio interior. En situaciones prácticas, estos fenómenos pueden afectar la cantidad de energía térmica realmente utilizable y la sensación de bienestar térmico experimentada.

Por otro lado, los patrones de radiación solar y temperatura ambiental empleados corresponden a condiciones típicas generadas mediante simulación, lo cual facilita el estudio de patrones y dinámicas globales, pero no reemplaza la verificación con información climatológica registrada directamente in situ. Del mismo modo, la representación del conjunto de radiadores se efectúa a través de un modelo simplificado, sin incluir aspectos de diseño geométrico ni procesos convectivos particulares.

Por otra parte, los hallazgos expuestos deben entenderse como un análisis de factibilidad operativa y de respuesta dinámica del sistema en escenarios estandarizados, en lugar de una proyección precisa del funcionamiento en una implementación práctica. Sin embargo, el modelo representa un fundamento robusto para la fase posterior del trabajo, enfocada en la comprobación mediante ensayos reales y el perfeccionamiento del sistema propuesto.

E. Consideraciones prácticas para el diseño e implementación

Los hallazgos obtenidos, proporcionan pautas clave para proyectar sistemas de calefacción solar en regiones altoandinas. Se evidencia que la sincronización entre el almacenamiento y el control tiene un peso equivalente al de la captación de energía. De hecho, un depósito con dimensiones óptimas podría fallar en mantener el confort nocturno si no cuenta con una gestión de control que administre eficientemente el calor acumulado.

De igual manera, el sistema de distribución —compuesto por el circuito hidráulico y los radiadores— es un componente vital para el éxito del conjunto. Se observa que, aun con un

tanque a alta temperatura, el rendimiento global puede verse limitado por un caudal insuficiente o una baja eficiencia en la transferencia de calor. Esta consideración debe tenerse especialmente en cuenta al seleccionar las dimensiones de equipos de bombeo, dispositivos de regulación y unidades de emisión térmica.

En términos de ejecución, el estudio indica que integrar un calentador eléctrico de apoyo, gestionado mediante una lógica de activación condicional, incrementa la robustez del sistema sin afectar drásticamente su eficiencia total. Este enfoque de respaldo es fundamental en zonas con alta fluctuación climática, donde la disponibilidad solar puede variar bruscamente de un día a otro.

En síntesis, las consideraciones expuestas ratifican que la calefacción solar no puede diseñarse de forma fragmentada. El éxito del sistema radica en un enfoque integrado, donde la configuración térmica, el dimensionamiento hidráulico y las leyes de control se coordinen y optimicen simultáneamente para garantizar un funcionamiento eficaz bajo las exigencias de entornos reales.

Los hallazgos de esta investigación se basan en un sistema dimensionado para espacios de pequeña escala, como viviendas o aulas. Sin embargo, el enfoque de modelado y la lógica de control propuestos poseen un carácter escalable; esto permite su aplicación en infraestructuras de mayores dimensiones, siempre que se realice un ajuste proporcional en la capacidad de captación, el volumen de los depósitos y la potencia de los emisores térmicos.

Asimismo, la metodología desarrollada es aplicable a diversas regiones caracterizadas por climas fríos y una fuerte insolación diurna, previo ajuste de los datos meteorológicos y las propiedades térmicas de la edificación. Por consiguiente, el modelo constituye un recurso valioso para realizar diagnósticos de viabilidad iniciales y para contrastar el rendimiento de diversas arquitecturas de calefacción solar.

Aunque el sistema mantuvo la temperatura interior dentro del rango de confort térmico (20–22 °C) durante el 91,36 % del periodo nocturno evaluado, se observaron desviaciones puntuales bajo condiciones climáticas críticas y durante periodos prolongados de demanda térmica. Este comportamiento evidencia que el desempeño del sistema depende no solo de la energía solar disponible, sino también de la capacidad de almacenamiento térmico, las pérdidas energéticas del recinto y la capacidad de transferencia de calor de los radiadores. En este contexto, futuros trabajos deberán considerar estrategias de optimización relacionadas con el incremento del volumen de almacenamiento, la mejora del aislamiento térmico y la implementación de técnicas avanzadas de control para reducir aún más la dependencia del sistema auxiliar eléctrico.

El porcentaje de tiempo en confort térmico obtenido (91.36 %) es consistente con resultados reportados en sistemas solares asistidos con almacenamiento térmico para climas fríos [8], [11]. Asimismo, el comportamiento dinámico del tanque de acumulación y la estabilidad térmica interior presentan

tendencias similares a las descritas por Zhao et al. [6] y Lamrani et al. [8], quienes reportan que el desempeño del sistema depende significativamente de la capacidad de almacenamiento y de las estrategias de control térmico implementadas.

IV. CONCLUSIONES

El conjunto de climatización solar basado en almacenamiento de calor sensible mediante agua y regulación automatizada analizado exhibe un rendimiento térmico apropiado para residencias situadas en regiones altoandinas. El sistema de calefacción solar evaluado logró mantener la temperatura interior dentro del rango de confort térmico (20–22 °C) durante el 91.36 % del periodo nocturno analizado, obteniendo un error cuadrático medio de 1.67 °C respecto al setpoint de 21 °C. Asimismo, el sistema alcanzó una captación solar útil de 124.5 kWh durante la semana de simulación, requiriendo un consumo auxiliar de 52.18 kWh para compensar condiciones críticas de operación.

Los resultados evidencian que la capacidad de entrega de calor y las pérdidas térmicas del recinto son variables determinantes para el cumplimiento del confort, incluso más influyentes que el volumen de almacenamiento considerado de forma aislada. Como trabajos futuros se recomienda la validación experimental del sistema, el ajuste fino de los parámetros de control y la evaluación de estrategias avanzadas que optimicen el aprovechamiento de la energía solar disponible.

AGRADECIMIENTO

Nuestro agradecimiento especial al vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional del Altiplano Puno, el cual ha financiado el trabajo de investigación.

REFERENCIAS

- [1] S. A. Kalogirou, *Solar energy engineering: processes and systems*. Elsevier, 2023.
- [2] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed. Wiley, 2013.
- [3] J.-C. Hadorn and G. B.-B. C. SA, "IEA Solar Heating and Cooling Programme Task 32: Advanced Storage Concepts for Solar and Low Energy Buildings," 2006.
- [4] C. N. Antoniadis and G. Martinopoulos, "Simulation of solar thermal systems with seasonal storage operation for residential scale applications," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 38, pp. 405–412, 2017.
- [5] J. Duan, Y. Liu, L. Zeng, Y. Wang, Q. Su, and J. Wang, "Experimental Investigation of a Novel Solar Energy Storage Heating Radiator with Phase Change Material," *ACS Omega*, vol. 6, no. 21, pp. 13601–13610, 2021, doi: 10.1021/acsomega.1c00138.
- [6] J. Zhao, X. Zhai, X. Zhang, K. Wang, and F. Chen, "Experimental study on dynamic thermal performance of seasonal hot water storage tank in a solar heating system," *Appl. Therm. Eng.*, p. 128424, 2025.
- [7] J. Feng, *Design and control of hydronic radiant cooling systems*. University of California, Berkeley, 2014.
- [8] B. Lamrani, A. Belcaid, B. E. Lebrouhi, J. M. Khodadadi, and T. El Rhafiki, "Dynamic thermal analysis of a coupled solar water

heaters-thermal storage tank for solar powered district heating networks,” *J. Energy Storage*, vol. 61, p. 106793, 2023.

- [9] T. Szul, “Application of a thermal performance-based model to prediction energy consumption for heating of single-family residential buildings,” *Energies*, vol. 15, no. 1, p. 362, 2022.
- [10] A. Afram and F. Janabi-Sharifi, “Theory and applications of HVAC control systems--A review of model predictive control (MPC),” *Build. Environ.*, vol. 72, pp. 343–355, 2014.
- [11] H. Cao, X. Li, H. Yu, C. Wang, H. Wang, and S. Qin, “Optimization of a solar-assisted air-source heat pump system in hot summer and cold winter regions,” *Appl. Therm. Eng.*, p. 129065, 2025.
- [12] C. E. Montes, S. Á. Pedro, and others, “Solar heating system to reduce Friaaje in high Andean homes,” *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 6, no. 4, pp. 1537–1544, 2016.
- [13] NASA, “{POWER Project}: Meteorological and Solar Radiation Data.” 2023, [Online]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/>.
- [14] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), “Datos climatológicos del departamento de Puno.” 2022.
- [15] J. Burch, L. Magnuson, G. Barker, and M. Bullwinkel, “Diagnosis of solar water heaters using solar storage tank surface temperature data,” 2009.
- [16] E. Aydar and İ. Ekmekçi, “Thermal Efficiency Estimation of the Panel Type Radiators with CFD Analysis,” *J. Therm. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 2, pp. 63–71, 2012, [Online]. Available: <https://acikerisim.ticaret.edu.tr/items/043636fc-6730-4b41-ba1b-1b933d330b8b>.
- [17] G. D. Kontes *et al.*, “Simulation-based evaluation and optimization of control strategies in buildings,” *Energies*, vol. 11, no. 12, p. 3376, 2018.
- [18] O. Villegas Mier *et al.*, “Predictive Control of a Real Residential Heating System with Short-Term Solar Power Forecast,” *Energies*, vol. 16, no. 19, p. 6980, 2023.
- [19] D. Kotrys-Działak and K. Stokowiec, “Temperature Distribution Analysis on the Surface of the Radiator: Infrared Camera and Thermocouples Results Comparison,” *Rocz. Ochr. Sr.*, vol. 25, no. March, pp. 37–44, 2023, doi: 10.54740/ros.2023.005.
- [20] ASHRAE, *ANSI/ASHRAE Standard 55-2020: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta, GA, USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2020.
- [21] ISO 7730, “Ergonomics of the Thermal Environment -- Analytical Determination of Thermal Comfort.” Geneva, Switzerland, 2005.