

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO RADIANTE ACOPLADO A UN INTERCAMBIADOR GEOTÉRMICO

Tomas Concha^{1,2}, Marcos Hongn^{1,2}, Federico Montenegro³

¹Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Grupo de Edificios Bioclimáticos, CONICET

²Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Exactas, Departamento de Física, Avda. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina
Tel. 0387-4255424 – Fax: 0387-4255389. Email: mhongn@unsa.edu.ar

³Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Departamento de Estudios de Reactores y Centrales, División Diseño y Análisis Neutrónico. Centro Atómico Constituyentes. Buenos Aires, Argentina.

Recibido 02/08/2025; Aceptado 06/10/2025

RESUMEN.- Los intercambiadores de calor geotérmicos (GHE), son sistemas que aprovechan la amortiguación de las variaciones térmicas por debajo de la superficie del suelo. Este fenómeno puede ser utilizado, por ejemplo, para el acondicionamiento térmico de edificios mediante el acople con sistemas radiantes termoactivados (TABS). En este trabajo, se evaluó el desempeño de un GHE horizontal acoplado a una casilla experimental con un sistema TABS en una de sus paredes, para el cual se generó un modelo térmico integral validado contra datos experimentales. Se obtuvo un ajuste con errores nRMSE% inferiores a 2,6 % para temperaturas y menores a 14% para flujos de calor. Posteriormente, mediante un análisis paramétrico del sistema integral (gTABS), se encontró que es posible incrementar sustancialmente el potencial de refrigeración del gTABS, mediante la reducción de la incidencia de radiación solar en la capa superficial de suelo donde se ubica el GHE, así como la implementación de estrategias de control adecuadas.

Palabras clave: Intercambiador Geotérmico Horizontal, Sistemas de enfriamiento radiante, Acondicionamiento térmico de edificios.

EVALUATION OF A RADIANT COOLING SYSTEM COUPLED TO A GEOTHERMAL HEAT EXCHANGER

ABSTRACT.- Geothermal heat exchangers (GHEs) are systems that leverage the thermal buffering of temperature variations that occur below the soil's surface. This phenomenon can be used, for example, for the thermal conditioning of buildings by coupling the GHEs with thermo-activated radiant systems (TABS). In this work, we evaluated the performance of a horizontal GHE coupled to an experimental test cell with TABS in one of its walls. For this system, a comprehensive thermal model was developed and validated against experimental data. We obtained a good fit with nRMSE% errors below 2.6% for temperatures and less than 14% for heat fluxes. Subsequently, through a parametric analysis of the integrated system (gTABS), we found that the gTABS's cooling potential can be substantially increased by reducing the incidence of solar radiation on the shallow soil layer where the GHE is located, as well as by implementing appropriate control strategies.

Keywords: Horizontal Geothermal Exchanger, Radiant Cooling System, Building Thermal Conditioning.

1. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda energética global, impulsada en gran parte por el sector de la edificación, que representa aproximadamente el 40% del consumo mundial total (Lucia et al., 2017), plantea la necesidad de adoptar soluciones más eficientes y sostenibles

para la climatización de edificios. En este contexto, surgen tecnologías de bajo consumo eléctrico para mejorar la eficiencia de la misma. Los sistemas embebidos con activación térmica (TABS) y los intercambiadores de calor geotérmicos (GHE), surgen como una tecnología prometedora para disminuir el consumo de energía (Leo Samuel et al., 2018; Aresti et al., 2018).



Esta obra está bajo Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Los GHE son sistemas que utilizan el subsuelo como fuente o sumidero térmico, aprovechando su temperatura relativamente estable, que es más cálida en invierno y más fría en verano que el aire exterior (Kerme & Fung, 2021). Ofrecen ventajas significativas sobre los sistemas convencionales, como una reducción del impacto ambiental de los edificios para calefacción y refrigeración, y menores costos operativos (Congedo et al., 2011). Un GHE, consiste en una tubería enterrada en el suelo, la cual puede ser dispuesta en diversas configuraciones, dentro de la cual circula un fluido caloportador encargado de intercambiar calor con el suelo. Existen dos grandes categorías según la disposición de las tuberías, horizontales y verticales (Aydin et al., 2015). En particular, los GHE horizontales, utilizan la inercia térmica del suelo y, si bien son una solución menos eficiente que los intercambiadores verticales (Hou et al., 2022), son una alternativa más económica y que no requiere de equipos especializados para las perforaciones en la instalación (Lucia et al., 2017). Sin embargo, necesitan de un área de suelo disponible de mayor extensión. Por ello, la optimización de su diseño es fundamental, lo que requiere modelos precisos que consideren la transferencia de calor en el terreno, así como la influencia de las variaciones de temperatura estacionales y las propiedades térmicas del suelo.

Paralelamente, los sistemas de tubos embebidos con activación térmica (TABS), también conocidos como sistemas radiantes, se presentan como una tecnología de bajo consumo energético para el acondicionamiento de edificios, proporcionando las condiciones interiores deseadas en cuanto a confort térmico y calidad del aire (Hongn et al., 2023). Estos sistemas pueden acoplarse a fuentes o sumideros de calor de baja entalpía, como los GHE, para reducir aún más el consumo de energía, los picos de demanda eléctrica y los costos asociados a la climatización, manteniendo los niveles deseados de confort interior (Montenegro et al., 2023). Sin embargo, la elevada inercia térmica de los TABS y sus respuestas térmicas retardadas presentan desafíos significativos para su control y optimización.

Para poder aprovechar plenamente el potencial de estos sistemas integrados (GHE-TABS), es necesario estimar con precisión su comportamiento térmico. Esto implica el desarrollo de modelos de transferencia de calor capaces de simular la interacción térmica entre el GHE y el TABS, considerando las variaciones en el terreno y las condiciones de operación del edificio. Estos componentes suelen ser parte del circuito de una bomba de calor geotérmica GSHP, dispositivo con gran potencial de aplicación en la climatización eficiente de edificios. Sin embargo, la interacción dinámica entre los componentes y los constantes cambios en las condiciones de operación, dificultan la modelización de estos sistemas, razón por la cual se recurre a herramientas de software siendo TRNSYS una de las más utilizadas (Rashid et al., 2023). En este sentido, Montagud et al., (2012) evaluaron el rendimiento de una planta de calefacción y refrigeración de un edificio de oficinas, monitoreada desde 2005. Para ello, utilizaron el software GLHEPRO para el diseño y TRNSYS para el modelo de bomba de calor. El suelo presenta una capacidad de recuperación superior a la esperada en comparación con GLHEPRO. El consumo de la bomba de calor fue predicho correctamente por el modelo de bomba de calor desarrollado en TRNSYS, presentando una desviación promedio del 2% con respecto a las mediciones experimentales. Por otro lado, Cacabelos et al., (2015) calibraron un modelo de simulación para el sistema HVAC de una biblioteca pública con un GCHP y piso radiante, utilizando TRNSYS. El sistema redujo el error de sesgo medio y el coeficiente de variación de la raíz cuadrada del error por debajo del 5% y el 12% respectivamente, al centrarse principalmente en el consumo

energético del sistema. Sin embargo, no es común encontrar en la literatura, modelos integrales simplificados para la simulación de un sistema global de intercambio de calor entre suelo y edificio.

En base a lo mencionado, en este trabajo se ha experimentado y modelado computacionalmente el comportamiento térmico de un prototipo de GHE horizontal, junto con la respuesta del suelo circundante, acoplado a un TABS, ubicado en una casilla experimental en el campus del INENCO. El modelado se llevó a cabo integrando los modelos computacionales, escritos en Python, de ambos dispositivos, en un nuevo modelo denominado gTABS. Este es evaluado y ajustado mediante datos medidos en el prototipo, para condiciones de verano, en la ciudad de Salta. Además, se han realizado simulaciones paramétricas, a fin de optimizar su funcionamiento para la refrigeración de una habitación en los meses más cálidos del año. Se evaluó el potencial de refrigeración del dispositivo y se propusieron estrategias de optimización mediante controles de funcionamiento que no consideraran dispositivos intermedios como bombas de calor o enfriadores en el sistema.

2. METODOLOGIA

2.1 Integración de modelos

El sistema se compone, a grandes rasgos, de dos dispositivos acoplados entre sí, un TABS y un GHE, dando como resultado un sistema integral denominado gTABS. El GHE es utilizado como fuente o sumidero de calor para el TABS con la finalidad de acondicionar térmicamente una habitación. El TABS se encuentra inserto en la pared norte de la casilla experimental, como se observa en la Figura 1, en donde también se ha indicado la ubicación de sensores de temperatura y de calor utilizados para las mediciones experimentales. A su vez, el GHE se encuentra ubicado a 20 metros de la casilla experimental, por lo que ambos intercambiadores se comunican entre sí mediante un canal que lleva las tuberías, a 70 cm por debajo de la superficie del suelo, de un intercambiador al otro (Figura 2).

Se ha desarrollado un modelo computacional, escrito en Python, que simula el comportamiento de la temperatura del suelo mediante un algoritmo de diferencias finitas. Este modelo, calcula la temperatura de superficie del suelo mediante un balance de energía que tiene en cuenta la absorción de radiación solar incidente sobre esta superficie y los intercambios convectivo, conductivo y radiativo de la misma. Posteriormente, el intercambio de calor entre el suelo y el fluido circulante por el prototipo de GHE, se calcula mediante el método ϵ -NTU. Esto hace posible la simulación térmica de un GHE horizontal de uno o más niveles a diferentes profundidades (Concha, 2025).

Este modelo ha sido integrado a un modelo desarrollado por el grupo de investigación, que describe el comportamiento térmico de la casilla experimental en conjunto con el TABS integrado a una de sus paredes mediante un modelo RC que se basa en la analogía de resistencias y capacitores eléctricos. El modelado del TABS se realiza mediante un programa, escrito en Python, que modela los elementos masivos del sistema como una combinación resistencia-capacitor, y los elementos no masivos como una resistencia térmica únicamente. Para el núcleo de hormigón, que tiene al TABS embebido (Figura 1a), se utiliza un modelo RC semi-dinámico, denominado "Umbrella", que contiene una fuente-sumidero de calor en su interior y que es posible de acoplar a otras capas constructivas (Hongn et al., 2023; Montenegro et al., 2024). El diagrama de modelado del núcleo de hormigón se presenta en la Figura 1b.

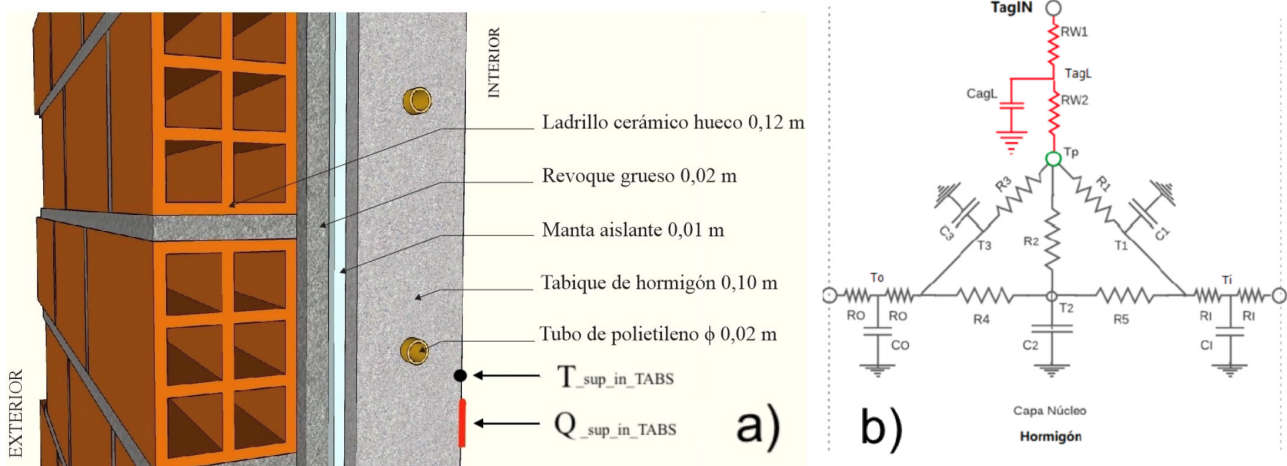


Fig. 1: a) TABS integrado en la envolvente vertical, b) modelo RC “umbrella” para el tabique de hormigón (núcleo) del TABS. (Hongn et al., 2023)

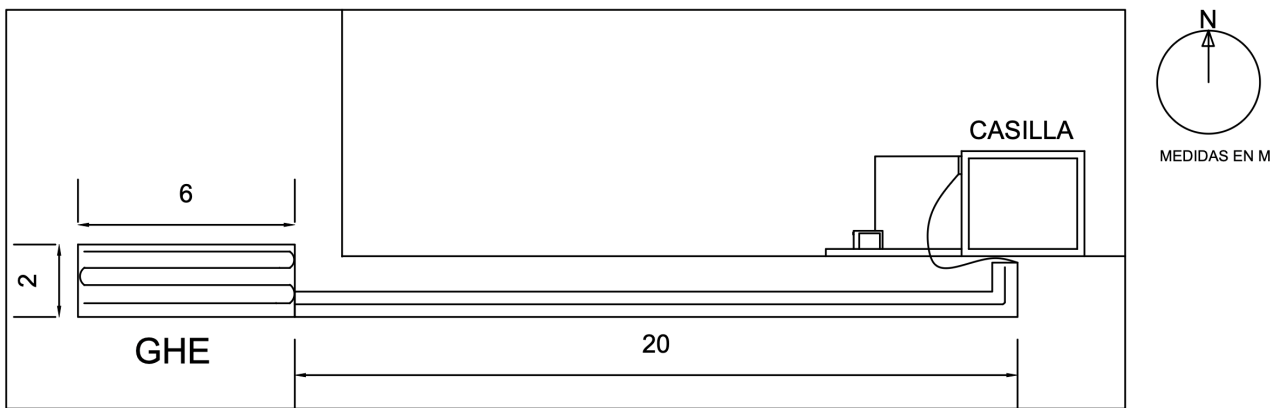


Fig. 2: Vista en planta de ubicaciones de casilla experimental, canal y GHE.

Para la resolución de las ecuaciones de transferencia de calor, ambos modelos utilizan el método iterativo. Por ello, se modificó el modelo de intercambiador geotérmico a fin de utilizarlo como una función que puede ser importada al modelo de TABS y que se acopla mediante la temperatura de salida de fluido del TABS, que se convierte en la temperatura de entrada de fluido del modelo de GHE. Con esta integración, son necesarias las condiciones iniciales de temperaturas de fluido, de las paredes de la casilla, del suelo, las propiedades físicas y constructivas de ambos y los datos climáticos. Por lo tanto, el modelo global prescinde del dato de temperatura de entrada de fluido para el cálculo, dato imprescindible en los modelos cuando son utilizados por separado. Para la casilla experimental, se realiza un preprocesamiento de los datos climáticos y se genera un archivo que contiene las temperaturas sol-aire, Callaghan y Probert, (1977), para cada superficie externa. Así, en el modelado de la misma, se utilizan estas temperaturas como condiciones de borde y se prescinde de ingresar valores de radiación y términos convectivos para cada superficie exterior.

En la Figura 3, se presenta un diagrama de flujo de funcionamiento de ambos códigos integrados. De esta figura se observa que, durante cada iteración sucede lo siguiente, se calculan los cambios en las temperaturas para la casilla experimental, junto con la temperatura de salida del TABS. Esta última temperatura, junto con las condiciones iniciales de suelo, ingresan al modelo del GHE para realizar los cálculos. Del modelo del GHE se obtie-

ne como salida la temperatura de fluido (Que será la entrada del TABS en el paso temporal siguiente) y las condiciones nuevas de suelo que deben ser reingresadas en el siguiente paso temporal.

3. RESULTADOS

3.1 Ajuste y desempeño térmico del modelo computacional global

Para evaluar el grado de ajuste del modelo, se utilizaron datos experimentales obtenidos del prototipo y se calcularon los errores de los valores arrojados por el modelo en las simulaciones. Se tienen datos medidos, con el sistema funcionando, para el periodo comprendido entre el 26/12/24 y el 08/01/25. Se decidió realizar medidas experimentales en todo el mes de diciembre ya que es un mes cálido, sin embargo, una serie de desperfectos en la red de sensores obligaron a acotar el periodo de medida al intervalo mencionado. En este sentido, si bien se cuenta con datos experimentales para periodos anteriores, los cuales han sido utilizados en la etapa de puesta a punto de funcionamiento del prototipo, se considera que los datos utilizados son suficientes para la evaluación de la respuesta del modelo. Esto debido a que las condiciones iniciales se establecen mediante los datos experimentales, minimizando las incertidumbres de las componentes transitorias (al inicio de la simulación), en donde el modelo requeriría de mayor cantidad de datos para devolver resultados realistas. Debido a la generalidad del modelo propuesto, la metodología puede ser

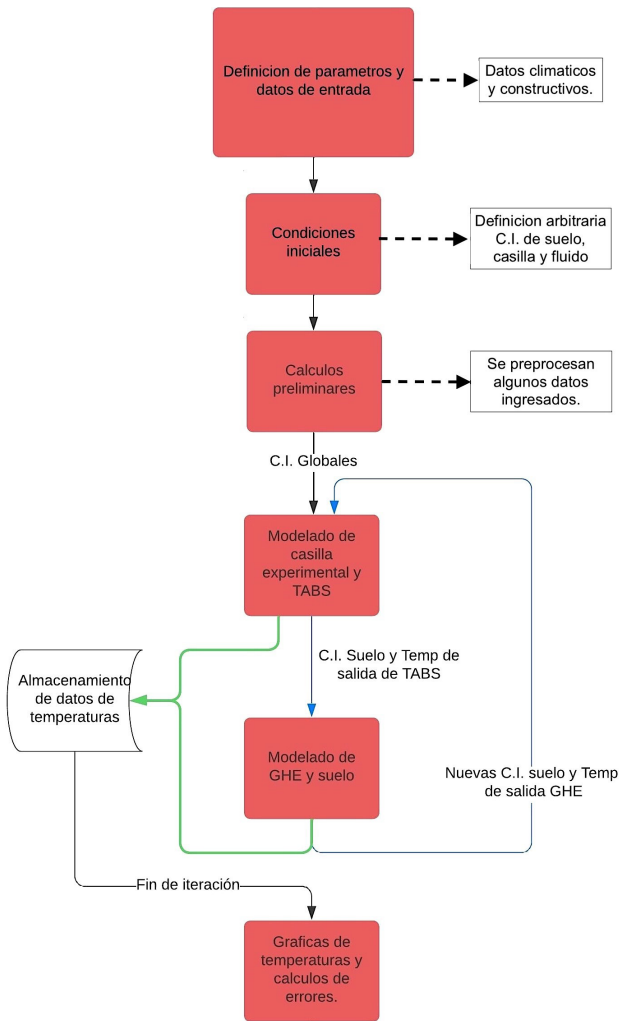


Fig. 3: Diagrama de flujo del código del modelo global.

extendida para otros periodos del año en donde el potencial de intercambio de calor sea mayor (mayor amplitud térmica), o bien para periodos de menores temperaturas, donde se esperaría, igualmente, un buen desempeño del modelo.

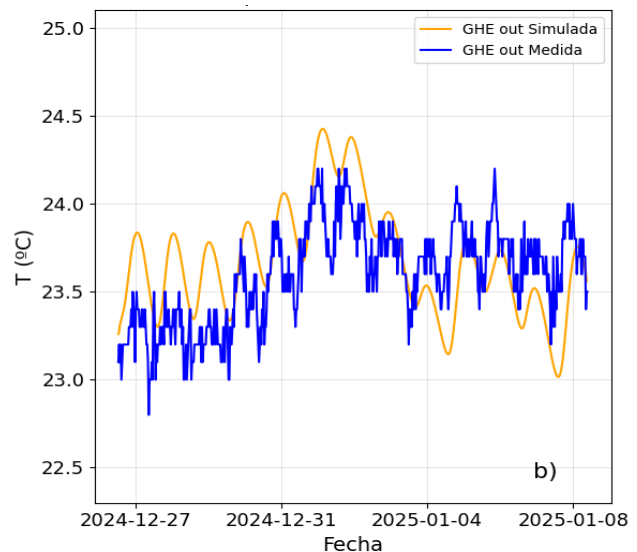
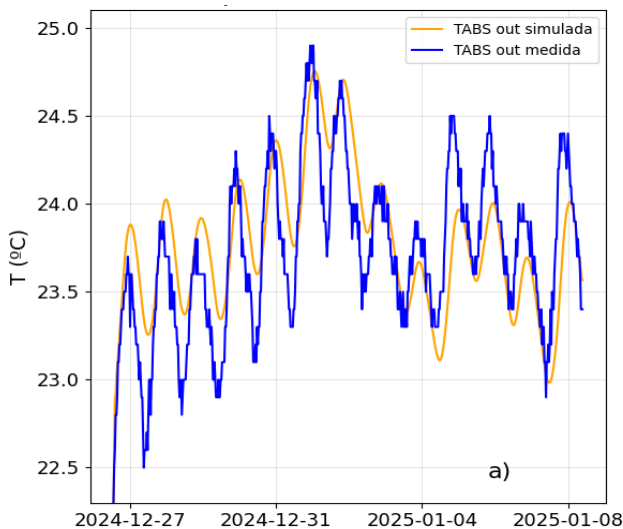


Fig. 4: Temperaturas de salida de fluido, medida y simulada para: a) TABS y b) GHE, en el periodo 26/12/24 al 08/01/25

En primer lugar, se observan las gráficas de temperatura de salida de fluido del GHE y del TABS (Figura 4). En términos comparativos, mediante Figura 4a, se observa la mayor amplitud térmica del fluido a la salida del TABS (con cambios diarios de hasta 1,5 °C), esto debido a que en este dispositivo el fluido se expone en mayor medida a los efectos climáticos externos. En cambio, cuando el fluido sale del GHE, Figura 4b, su temperatura presenta una menor amplitud (con cambios diarios de hasta 0,7 °C), atenuando hasta en un 50% la amplitud térmica diaria, esto debido a que intercambia calor con el suelo, el cual posee una alta inercia térmica y por ende temperaturas más estables mientras mayor sea la profundidad. Se debe tener en cuenta que la temperatura de salida de fluido del GHE es la de entrada de fluido al TABS y viceversa.

En cuanto a la transferencia de calor, los flujos de calor en la superficie interna de la pared del TABS y el flujo de calor disipado al suelo mediante el GHE se observan en la Figura 5. Se puede ver que la simulación del flujo de calor en la superficie interna no se ajusta totalmente a los valores medidos, sobre todo en los periodos en los que la pared cede calor al interior de la casilla experimental. Esto puede ser ocasionado por desajustes en la simulación de la temperatura ambiente de la casilla experimental durante las horas de la noche, lo que se analiza en apartados posteriores.

Para la determinación del grado de ajuste del modelo, se han calculado valores del error de sesgo normalizado (nBIAS%), la raíz del error cuadrático medio (nRMSE%) y coeficiente de correlación (r), Wackerly y Scheaffer (2008), para las diferentes variables simuladas. Por ejemplo, temperatura de superficie en la pared del TABS ($T_{sup_in_TABS}$) (Figura 6b), temperatura ambiente en la casilla experimental ($T_{amb_casilla}$) (Figura 6a), temperaturas de entrada y salida de TABS y GHE (T_{TABS_in} y T_{TABS_out}), calor absorbido por la superficie interna de la pared del TABS ($Q_{sup_int_TABS}$) y calor absorbido por el TABS ($Q_{absorbido_TABS}$), este último es igual al calor disipado al suelo por el GHE. Los valores obtenidos de los mencionados errores se indican en la Tabla 1.

Es importante aclarar que, en el modelado de la casilla experimental como una red térmica, el nodo que representa el aire interior es el nodo central de dicha red. Algunas ramas térmicas que conectan con este nodo pueden presentar un ligero desajuste con el comportamiento real, por ejemplo, la temperatura utilizada

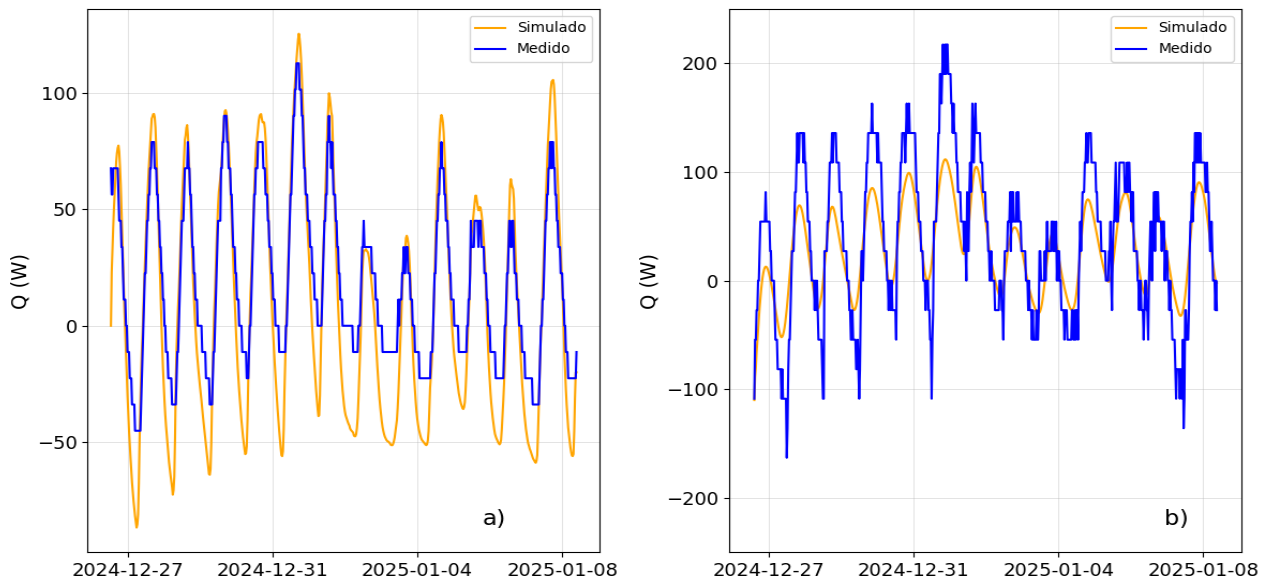


Fig. 5: Flujos de calor medido y simulado a) absorbido por la superficie interna de la pared del TABS por unidad de área y b) depositado al suelo por el GHE, en el periodo 26/12/24 al 08/01/25

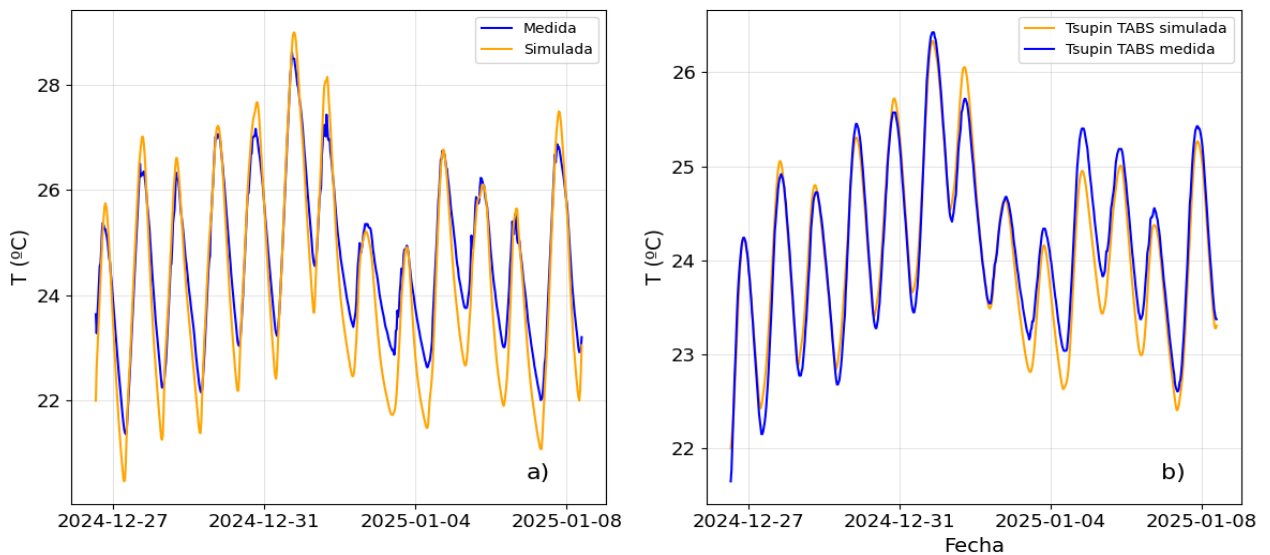


Fig. 6: Evolución de temperaturas medidas y simuladas en la casilla experimental: a) aire ambiente y b) superficie interna de la pared del TABS, entre el 26/12/24 y el 08/01/25

Tabla 1: parámetros estadísticos de ajuste para el periodo diciembre 2024 - enero 2025.

Variable:	nBIAS%	nRMSE%
$T_{amb_casilla}$	1,51 %	2,68 %
$T_{sup_in_TABS}$	-0,33 %	1,04 %
T_{TABS_in}	0,33 %	1,36 %
T_{TABS_out}	-0,02 %	1,51 %
$T_{suelo_1,5m}$	-0,18 %	0,92 %
T_{suelo_2m}	0,43 %	1,03 %
$Q_{sup_int_TABS}$	-6,29 %	13,79 %
$Q_{absorbido_TABS}$	-2,19 %	8,41 %

para el ambiente exterior de la casilla experimental es registrada en una estación meteorológica ubicada en el techo del edificio de Ingeniería de la UNSA y puede no corresponder precisamente al aire exterior circundante al prototipo. A fines de verificación del modelo, se considera que la respuesta es aceptable contra las mediciones experimentales registradas, y permite evaluar el gTABS para el marco experimental medido y para escenarios supuestos.

3.2 Análisis paramétrico del modelo de gTABS

Se realizó un análisis paramétrico, a fin de determinar cuánto afecta un cambio en las condiciones de operación del GHE a las condiciones térmicas simuladas en el TABS. Para ello se ha definido un caso base que se utilizará como referencia de comparación para todas las variaciones en los parámetros. El caso base hace uso del archivo EPW para la Ciudad de Salta, obtenido de la base de datos OneBuilding (Climate.onebuilding.org).

Para las simulaciones paramétricas no se considera el canal del GHE por donde se llevan los tubos de la casilla a la fosa principal (Figura 2). Esto con el fin de obtener una mejor visualización de los cambios en las condiciones de operación y simplificar el modelado del gTABS. Se ha fijado un albedo de 0,3 para todas las simulaciones, se fija la profundidad de los serpentines del GHE en 1,5 y 2 m y se fija la difusividad del suelo en $0,8 \times 10^{-6}$ m²/s, condiciones que son similares a las del prototipo experimental. Se ha determinado realizar un año de simulación mediante el EPW, para el cual el gTABS funciona en el primer trimestre del año, se apaga los dos siguientes y se enciende nuevamente en el último trimestre. Las variables a evaluar son $T_{sup_in_TABS}$, T_{in_GHE} (temperatura de entrada al GHE, es igual a T_{TABS_out}), T_{out_GHE} (temperatura de salida del GHE, es igual a T_{TABS_in}), $Q_{sup_in_TABS}$ (si es positivo la habitación está siendo refrigerada) y $Q_{absorbido_TABS}$.

3.3 Parametrización por radiación

Se realizó un análisis del impacto que genera una reducción en la radiación incidente sobre la superficie del suelo en la zona del GHE, considerando reducciones de 20%, 40% y 60% sobre esta, como si se tratase de un sombreado mediante media sombras. Cabe aclarar que, al utilizar un modelo unidimensional, se considera que todo el suelo se encuentra sombreado y no se tiene en cuenta que el suelo aledaño a la zona del intercambiador pueda recibir radiación solar. Al analizar la Figura 7, se puede observar que el sombreado por encima del GHE tiene un impacto positivo en cuanto a la refrigeración de la casilla experimental. Se puede ver la reducción en general de temperatura en la cara interna de la pared del TABS durante todo el periodo de funcionamiento, reducciones superiores a 1,5 °C para el caso en el que la radiación incidente se atenúa en un 60% (Figura 7a).

En esta superficie, se puede notar una mayor cantidad de calor absorbido debido al descenso de la radiación sobre el GHE. También, se reducen los periodos en que la pared cede calor a la habitación, es decir, momentos en los que el $Q_{sup_in_TABS} < 0$ W/m², haciendo que el gTABS sea utilizable mayor cantidad de tiempo. Esto se observa en la Figura 7b, la cual está ampliada para el mes de noviembre. Esta propuesta de mejora ha sido observada como la más efectiva, y práctica, entre una serie de alternativas presentadas en otro trabajo, inédito, focalizado en el modelado y estudio del GHE.

En la Tabla 2, se observan los resultados obtenidos para las medias diarias de la energía disipada al suelo, para todo el periodo de funcionamiento del sistema y de la energía absorbida por la superficie interna de la pared norte. También se observan porcentajes de diferencia de ambas variables con el caso base y la temperatura media

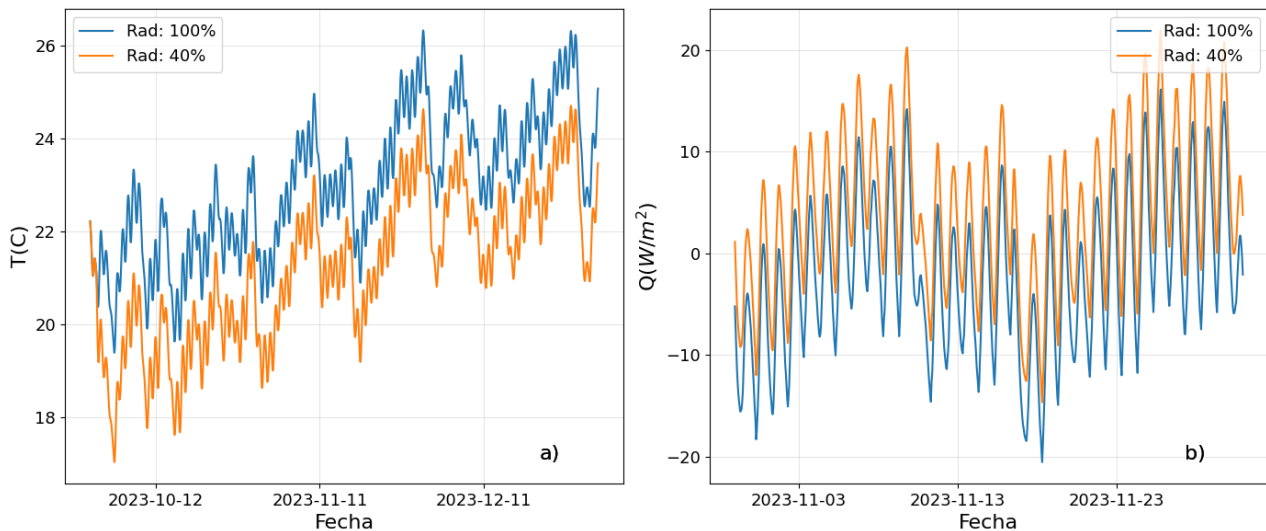


Fig. 7: Efecto de la reducción de radiación solar sobre la superficie externa del GHE, a) $T_{sup_in_TABS}$, octubre a diciembre y b) $Q_{sup_in_TABS}$ para el mes de noviembre.

Tabla 2: Cambios ocasionados por las diferencias de radiación.

I sobre GHE (%)	$Q_{absorbido_TABS}$ media diaria (Wh/Día)	Diferencia con caso base (%)	$Q_{sup_in_TABS}$ media diaria (Wh/día)	Diferencia con caso base (%)	$T_{sup_in_TABS}$ media periodo (°C)
100 %	414,67	0,00	317,54	0,00	23,41
80 %	641,41	54,68	400,07	25,99	22,98
60 %	924,99	123,07	505,79	59,28	22,53
40 %	1257,81	203,33	637,08	100,63	22,08

de la superficie interna de la pared del TABS, para el periodo de funcionamiento del sistema. Cabe aclarar que solo se han tenido en cuenta los periodos en los que se refrigera la habitación para el cálculo de estos valores. Como se puede observar, una mejora de 203% en la energía disipada al suelo implica una mejora en un 100% de la energía absorbida por la superficie interna de la pared norte y esto ocasiona una disminución de 1,3°C en la temperatura media de la superficie interna de la pared norte de la casilla experimental en todo el periodo de simulación. Esto sugiere que un cambio en la cantidad de calor disipado en el GHE no afecta en la misma proporción al calor absorbido del lado interno de la pared del TABS, esto debido a que la pared absorbe calor también desde su lado externo.

3.4 Estrategias de control

A fin de optimizar el funcionamiento del gTABS, se han propuesto y evaluado, mediante simulaciones, tres estrategias de control del sistema. Estas estrategias tienen como foco la mejora en la refrigeración de la casilla experimental en los meses más cálidos del año.

3.5 Estrategia de control A: ON-OFF

Implementa un control de funcionamiento del GHE, que lo desactiva siempre que no sea capaz de refrigerar la casilla experimental. Es decir, un control ON-OFF de la bomba de circulación del sistema. Esto tiene como objetivo refrigerar la habitación en los meses más cálidos. Así, el control responde a la siguiente condición:

- $T_{in_GHE} < T_{out_GHE}$: Se desactiva el gTABS.

Mediante esta estrategia, se logra un decrecimiento en la temperatura $T_{sup_in_TABS}$, como se observa en la Figura 8a. En donde la curva azul (correspondiente a $T_{sup_in_TABS}$ cuando se aplica el control sobre el funcionamiento del sistema) se mantiene siempre por debajo de la curva de funcionamiento continuo. Para el caso del enfriamiento del flujo de agua en el GHE, el calor descargado en el suelo es despreciable, para el mes analizado, cuando se aplica la estrategia de control (Figura 8b). Esta estrategia mejora el desempeño del gTABS al evitar su operación cuando las condiciones del suelo no favorecen la refrigeración; también disminuye el consumo de energía, ya que la bomba de circulación funciona menos tiempo.

3.6 Estrategia de control B: BY-PASS

Otra propuesta de mejora implica el monitoreo de temperaturas del control de encendido y apagado, con la diferencia de que cuando el intercambiador está absorbiendo calor del suelo, no se apaga el sistema, sino que se disipa este calor. Se supone la existencia de un sumidero de calor ficticio ("virtual"), donde se disipa todo el calor absorbido del suelo, haciendo que este se enfríe. Cuando el suelo es capaz de refrigerar la habitación nuevamente, el sistema vuelve al funcionamiento normal. Este sistema de control sigue el siguiente razonamiento:

- $T_{in_GHE} > T_{out_GHE}$: circulación de agua por TABS y GHE.
- $T_{in_GHE} < T_{out_GHE}$: el agua circula sólo por el GHE. Al descargar calor en un "sumidero virtual" de tal forma que su temperatura sea nuevamente T_{in_GHE} .

Con este mecanismo de control, se eliminan los periodos en los que el funcionamiento continuo es contraproducente y se mantiene el efecto de enfriamiento en el suelo, así, se obtienen menores temperaturas de suelo y mayores periodos de funcionamiento del TABS refrigerando la habitación. Lo mencionado se puede observar en la Figura 9a, donde se ilustra el flujo de calor depositado en el suelo para el mes de febrero, el cual fue identificado como el mes que menos favorece la refrigeración mediante el GHE. La utilización de este sistema también tiene un impacto en la reducción de la temperatura $T_{sup_in_TABS}$, en donde la curva de temperatura del control BY-PASS siempre se ubica por debajo de la estrategia ON-OFF. Esto se puede observar en la Figura 9b.

3.7 Estrategia de control C: SERPENTÍN SUPERIOR

Esta estrategia aprovecha el hecho de que, durante la construcción del prototipo de GHE, se dispuso un serpentín de circulación de fluido a nivel superior (1 m de profundidad) e independiente del GHE. Este serpentín no ha sido utilizado para medidas experimentales al momento de la realización de este trabajo, sin embargo, se plantea una estrategia en la que esta parrilla se utiliza en conjunto con otro intercambiador, tipo radiativo por ejemplo, de dimensiones similares (50 m), que intercambia calor con el aire

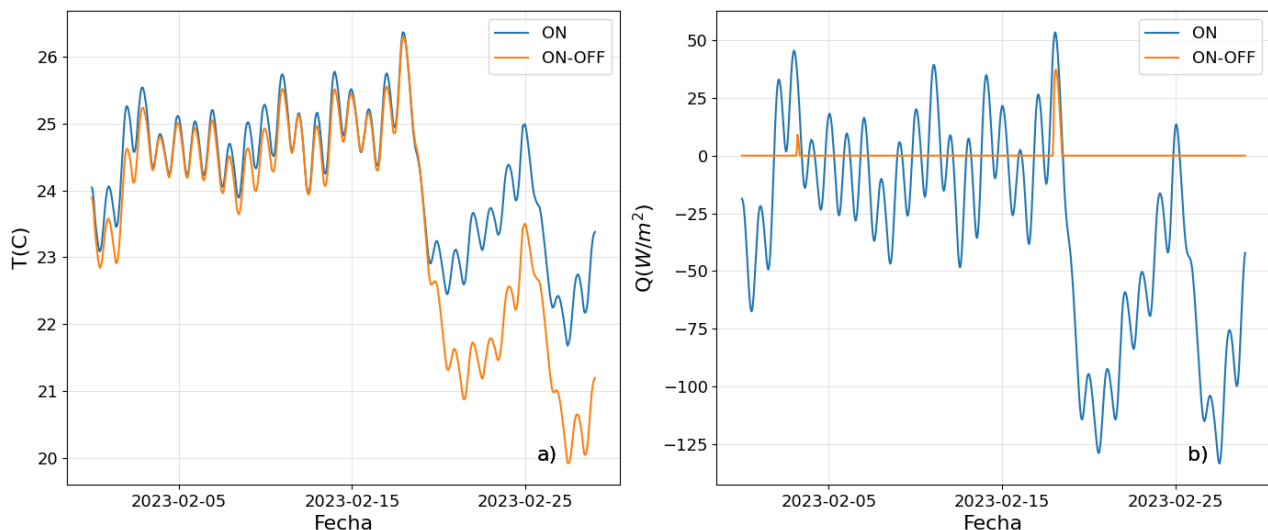


Fig. 8: Operación de la estrategia ON-OFF durante el mes de febrero, a) $T_{sup_in_TABS}$, b) $Q_{absorbido_TABS}$.

ambiente. La condición que sigue este intercambiador es:

- $T_{suelo_1m} > T_{amb}$: circula agua por esta capa y se enfría en un intercambiador radiativo.

Así, este sistema funciona como una barrera térmica que evita el incremento excesivo de temperatura en las capas inferiores de suelo. Este sistema se combina con el control ON-OFF en el gTABS, a fin de utilizar los intercambiadores inferiores solamente cuando actúan de sumidero de calor. Mediante simulaciones, se determinó que este sistema es el más conveniente en cuanto al calor que absorbe de la habitación, si se lo compara con los otros dos sistemas de control propuestos. En la Figura 9b, se observa que, para el mes de febrero, se aumenta la cantidad de días en los que el gTABS funciona a la vez que se aumenta la cantidad de calor que este remueve en todo momento. También se observa una disminución en la temperatura $T_{sup_in_TABS}$ para todo el periodo simulado (Figura 9a).

En términos prácticos, esta propuesta necesitaría dos bombas diferentes y dos dispositivos de control ON-OFF independientes. Por lo tanto, es una solución más compleja, sin embargo, no requiere de desviaciones en el circuito hidráulico al tratarse de dos circuitos individuales. Esta opción es viable de llevarse a cabo desde lo experimental, debido a que no implica grandes costos para la adquisición de los elementos faltantes (bomba y módulos de control electrónico).

3.8 Análisis comparativo

En la Tabla 3 se resume, en términos cuantitativos, los valores medios diarios para todo el periodo de operación (ene-feb-mar

y oct-nov-dic) de $Q_{absorbido_TABS}$, y $Q_{sup_in_TABS}$, y $T_{sup_in_TABS}$. Esto para cada una de las estrategias y para el caso de sistema siempre apagado, junto con sus respectivas diferencias con el caso base. De la tabla, se observa que la estrategia C es la mejor en cuanto a la extracción de calor de la habitación. Como se mencionó, de las Figuras 9a y 9b, se observa que para la estrategia A, el gTABS solo funciona en dos días del mes, mientras que la estrategia C, funciona la mayor parte de este periodo. Un análisis similar puede realizarse al comparar la estrategia C con la B, presentando la primera mayor prestación para el enfriamiento del espacio.

Este análisis paramétrico muestra que, mediante una estrategia de control simple, como la estrategia A, se puede aumentar la cantidad de calor absorbido por la superficie de la pared donde se encuentra el TABS en un 16,9%. También refleja que estrategias más complejas, como las B y C, aumentan en mayor medida esta cantidad de calor absorbido, en un 36,6% y un 88% respectivamente. Sin embargo, la estrategia B necesita de una derivación del circuito hidráulico y de una bomba encendida constantemente, y la estrategia C necesita dos circuitos hidráulicos independientes y dos dispositivos de control.

Algo a tener en cuenta a la hora de comparar los controles propuestos, es que el funcionamiento continuo de los dispositivos tiene un mayor consumo eléctrico, ya que mantiene la bomba funcionando todo el tiempo. Por lo que otro parámetro a evaluar será si el mayor consumo de la bomba es justificado por una mayor extracción de calor o si lo que se prefiere es el ahorro de energía en el funcionamiento del sistema. Otro aspecto a tener en cuenta para la interpretación de los resultados, es que en las simulaciones no se han considerado factores económicos, por lo que no se contemplan los posibles costos adicionales que conllevaría la

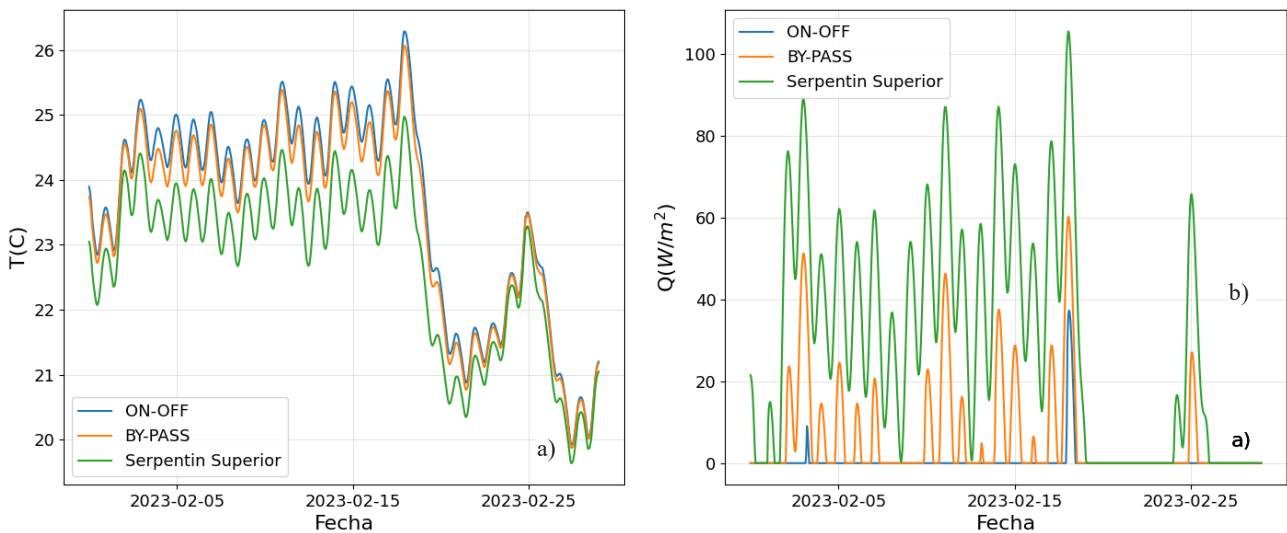


Fig. 9: Comparación de las tres estrategias propuestas durante febrero, a) $T_{sup_in_TABS}$ y b) $Q_{absorbido_TABS}$

Tabla 3: Energía removida por TABS y por la superficie interna de pared norte.

Metodo de funcionamiento	$Q_{absorbido_TABS}$ media diaria (Wh/Día)	Diferencia con caso base (%)	$Q_{sup_in_TABS}$ media diaria (Wh/día)	Diferencia con caso base (%)	$T_{sup_in_TABS}$ media periodo (°C)
Caso base	414,67	0,00	317,54	0,00	23,41
Apagado	0,00	-100,00	316,44	-0,35	23,34
A	270,86	-34,68	371,17	16,89	23,04
B	540,31	30,30	433,83	36,62	22,73
C	1106,00	166,72	597,32	88,11	22,09

instalación de sistemas más complejos, con la inclusión de bombas, incremento de metros de tubos de intercambiador, incorporación de dispositivos de control y actuadores electrónicos.

4. CONCLUSIONES

Se realizó la construcción y ensayo experimental de un intercambiador geotérmico acoplado a un sistema de acondicionamiento térmico de edificios, a nivel prototipo. Se realizaron mediciones de temperatura de suelo en diferentes profundidades para periodos de días consecutivos de funcionamiento del GHE. Esto en paralelo con el monitoreo del comportamiento térmico de una casilla experimental la cual posee un sistema TABS en su pared norte al cual se acopla el circuito del GHE, lo que da lugar a un sistema de acondicionamiento térmico integral denominado, por sus componentes principales, gTABS.

Se realizó la conexión del modelo computacional de GHE con un modelo de sistema TABS en edificio mono-zona desarrollado anteriormente, obteniendo un modelo térmico integral entre el sistema radiante TABS y el sumidero de calor representado por el GHE. Se realizó la simulación de este sistema modelando las condiciones y propiedades del sistema experimental construido en el campo de pruebas del INENCO. Se compararon los resultados de la simulación con las medidas experimentales para un mes cálido, obteniendo ajustes satisfactorios. El modelo integral presenta resultados de ajuste prometedores con valores de nRMSE% inferiores a 2% para las temperaturas, de 8,4% para la tasa calor transferido por el GHE al suelo y 13,8% para la tasa de calor sobre la superficie de la pared norte de la casilla experimental. Esto permitió evaluar el modelo global considerando diversos escenarios en cuanto a metodologías de control de flujo de agua, con el objetivo de refrigerar una habitación en los meses cálidos. No se han evaluado aún propuestas de control y operación para periodos en los que el sistema pueda calefaccionar una habitación.

Para el modo de funcionamiento continuo (sin estrategias de control) se ha descubierto que no produce refrigeración durante los meses más cálidos, para las condiciones climáticas de la Ciudad de Salta y para el tipo de suelo donde se instaló el GHE. Se simularon estrategias de control, enfocadas en la refrigeración de la casilla, ON-OFF (A), BY-PASS (B) y Serpentin Superior (C). Esta última emplea un intercambiador de calor en una capa superior, independiente, que funciona como una barrera térmica entre las condiciones del ambiente y del suelo por debajo de esta capa. De la comparación entre estrategias, la C demostró ser la de mayor prestación, debido a que presenta un mayor periodo de funcionamiento y una mayor tasa de calor removido, sobre la superficie de la pared, un 88% mayor que el caso base.

En función de los resultados encontrados en este estudio, para las condiciones climáticas de la ciudad de Salta y para el tipo de suelo ensayado, la implementación de un sistema radiante para enfriamiento de edificios con intercambiador de calor geotérmico requiere, además, la incorporación de un equipo auxiliar que incremente la potencia de enfriamiento. El equipo más adecuado, por desempeño termodinámico, podría ser la bomba de calor geotérmica.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por el proyecto de investigación tipo A del Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSA) N° 2918/0.

REFERENCIAS

- Aresti, L., Christodoulides, P., y Florides, G. A. (2018). A review of the design aspects of ground heat exchangers. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 92, 757-773.
- Aydin, M., Sisman, A., Gultekin, A., y Dehghan, B. (2015). An Experimental Performance Comparison between Different Shallow Ground Heat Exchangers. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*.
- Cacabelos, A., Eguía, P., Míguez, J. L., Granada, E., y Arce, M. E. (2015). Calibrated simulation of a public library HVAC system with a ground-source heat pump and a radiant floor using TRNSYS and GenOpt. *Energy And Buildings*, 108, 114-126.
- Climate.onebuilding.org. (s. f.). <https://climate.onebuilding.org/>
- Concha Torres, T. A. (2025). Evaluación y modelado de un intercambiador de calor geotérmico horizontal para acondicionamiento térmico de edificios, [Tesis de grado, Licenciatura en Energías Renovables]. Universidad Nacional de Salta.
- Congedo, P., Colangelo, G., y Starace, G. (2011). CFD simulations of horizontal ground heat exchangers: A comparison among different configurations. *Applied Thermal Engineering*, 33-34, 24-32. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.09.005>
- Hongn, M. E., Bre, F., Valdez, M. F., y Larsen, S. F. (2022). Two novel resistance-capacitance network models to predict the dynamic thermal behavior of active pipe-embedded structures in buildings. *Journal of Building Engineering*, 47, 103821.
- Hongn M., Montenegro F., Gea Salim C., y González S. (2023). Modelo semi-dinámico para la determinación del comportamiento térmico de sistemas radiantes de tubos embebidos. *Energías Renovables y Medio Ambiente (ERMA)*. Vol. 50, 2023, pp. 13-21, ISSN en línea 2684-0073.
- Hou, G., Taherian, H., Song, Y., Jiang, W., y Chen, D. (2022). A Systematic review on optimal analysis of horizontal heat exchangers in ground source heat pump systems. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 154, 111830. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111830>
- Kerme, E. D., y Fung, A. S. (2021). Heat transfer analysis of single and double U-tube borehole heat exchanger with two independent circuits. *Journal Of Energy Storage*, 43, 103141. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103141>
- Leo Samuel, D. G., Nagendra, S. M. S., y Maiya, M. P. (2018). Parametric analysis on the thermal comfort of a cooling tower based thermally activated building system in tropical climate – An experimental study. *Applied Thermal Engineering*, 138(September 2017), 325–335. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.077>
- Lucia, U., Simonetti, M., Chiesa, G., y Grisolia, G. (2017). Ground-source pump system for heating and cooling: review and Thermodynamic approach. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 70, 867-874.
- Montagud, C., Corberán, J. M., y Ruiz-Calvo, F. (2012). Experimental and modeling analysis of a ground source heat pump system. *Applied Energy*, 109, 328-336. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.025>

- Montenegro, F., Hongn, M., y Concha, T. (2023). Desempeño térmico de un sistema de enfriamiento radiante de tubos embebidos integrado a una envolvente edilicia. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 27, 113-123.
- P.W. O'Callaghan, S.D. Probert, Sol-air temperature, *Applied Energy*, Volume 3, Issue 4, 1977, Pages 307-311, ISSN 0306-2619, [https://doi.org/10.1016/0306-2619\(77\)90017-4](https://doi.org/10.1016/0306-2619(77)90017-4).
- Rashid, F. L., Dhaidan, N. S., Hussein, A. K., Al-Mousawi, F. N., & Younis, O. (2023). Ground heat exchanger in different configuration: Review of recent advances and development. *Geoenergy Science And Engineering*, 227, 211872. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211872>
- Wackerly, Dennis; Scheaffer, William (2008). *Mathematical Statistics with Applications (7 edición)*. Belmont, CA, USA: Thomson Higher Education. ISBN 0-495-38508-5.