

## **DESEMPEÑO TÉRMICO DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO RADIANTE MEDIANTE TUBOS EMBEBIDOS INTEGRADO A UNA ENVOLVENTE EDILICIA**

**Federico Montenegro<sup>2</sup>, Marcos Hongn<sup>1,2</sup>, Tomas Concha<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup> Universidad 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

**RESUMEN:** Los sistemas de tubos embebidos con activación térmica (APES) pueden ser acoplados a fuentes/sumideros de baja entalpía para ofrecer reducciones en el consumo de energía, en los picos de demanda eléctrica y en los costos de la energía, asociados al acondicionamiento de edificios, sin resignar los niveles deseados de confort interior. Debido a su naturaleza dinámica y su importante inercia térmica, se requiere la implementación de modelos que representen de manera precisa el comportamiento térmico de estos sistemas. Es por ello, que se implementa un modelo RC denominado “umbrella”, obtenido previamente por los autores, para simular la influencia de un sistema APES integrado a un edificio. Se evalúa el desempeño energético del APES acoplado en los diferentes componentes de la envolvente edilicia con aislación, para el periodo de verano, para un monoambiente emplazado en la ciudad de Salta. Se observa que la inclusión del sistema radiante disminuye significativamente la carga térmica de enfriamiento cuando es integrado sobre los componentes asoleados de la envolvente, en especial el techo, con mayor impacto en la temperatura ambiente interior, con un valor medio en el periodo de verano de 24,9°C para el caso base y 23,5°C para el caso mencionado.

**Palabras clave:** APES, sistemas radiantes, acondicionamiento bioclimático de edificios, eficiencia energética.

### **INTRODUCCIÓN**

Los sistemas de tubos embebidos con activación térmica (APES) han demostrado su potencialidad para incrementar la eficiencia energética en los edificios, lo que ha alentado al desarrollo de diversos trabajos de investigación en este campo, como se refleja en artículos de revisión recientes acerca de los aspectos fundamentales de los APES (Krajcik et al., 2021; Hassan y Abdelaziz, 2020) y los principales desafíos en el control de esta tecnología (Olsthoorn et al. 2017). El potencial de estos sistemas es de especial interés frente a los grandes consumos de energía del sector a nivel mundial. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2022) los mayores consumidores de electricidad, en la actualidad, son los sectores de la construcción y la industria, que juntos representan más del 90 % del consumo mundial de electricidad y han contribuido con más del 90 % (alrededor de 5700 TWh) al crecimiento de la demanda mundial de electricidad desde 2010. En los edificios, la energía eléctrica se consume principalmente por el uso de electrodomésticos (45%) y por refrigeración y calefacción de espacios (aproximadamente el 30%). En consecuencia, la situación actual demanda la implementación de tecnologías que promueva la eficiencia energética en el ambiente construido y que colaboren al incremento de la contribución de energías renovables, requerimientos que los APES pueden satisfacer completamente.

Los sistemas APES consisten de tubos embebidos en la estructura del edificio, generalmente en la envolvente, tal como pisos, techos de losa o paredes. Estos tubos intercambian calor directamente con la masa térmica del edificio, calor que luego es intercambiado con el espacio interior. Primero, esta interacción con la inercia térmica es útil para almacenar calor, lo que ayuda a amortiguar las fluctuaciones de temperatura interior causadas por ganancias internas y/o condiciones climáticas exteriores. En segundo lugar, los APES pueden utilizar las grandes superficies del edificio para intercambiar calor con los espacios interiores, lo que permite lograr una transferencia de calor significativa mediante gradientes bajos de temperatura (Lehmann et al., 2007). En consecuencia, estos sistemas se pueden utilizar para calefacción a baja temperatura y refrigeración a alta temperatura, lo que mejora la eficiencia en los procesos de climatización y permite la integración de fuentes de energía renovables como ser: enfriamiento nocturno, intercambiadores calor geotérmico GHE (Romaní et al., 2018), etc. Finalmente, la naturaleza del intercambio de calor con los ocupantes, principalmente radiativa, permite lograr mejores condiciones de confort interior regulando adecuadamente la temperatura radiante media y, por lo tanto, en un rango conveniente de temperatura operativa (Henze et al., 2008). Estas características dan lugar al requerimiento de modelos térmicos dinámicos de precisión para estudiar el comportamiento termodinámico de los APES, mediante simulación, permitiendo evaluar el impacto de su integración en los edificios y las condiciones de operación y control adecuadas.

Para modelar la contribución y efecto de los APES como sistemas constructivos integrados en los edificios es importante considerar que estos sistemas actúan para modificar el ambiente térmico del espacio interior, pero lo hacen alterando la temperatura de las superficies en lugar de simplemente cambiar las condiciones del aire que se suministra al espacio. Por lo tanto, un modelo integral debe tener en cuenta los cambios en la superficie o superficies que resultan de agregar o quitar calor de las mismas, mientras también modela la transferencia de calor dinámica que tiene lugar en el resto del espacio y/o edificio (Strand, 2022). En este sentido fue desarrollado un modelo numérico integral para simular la transferencia de calor conjugada transitoria en la envolvente de un edificio con APES (Shen y Li, 2016). Este estudio se focalizó en la evaluación energética en la temporada de verano, de manera comparativa, sobre diferentes escenarios climáticos (tres ciudades de China) y para el sistema APES ubicado en diferentes componentes de la envolvente. Una de las conclusiones interesantes es que el sistema APES puede proporcionar una mayor reducción en la carga térmica en los lados soleados del edificio, por ejemplo, la reducción de la carga de enfriamiento con el sistema integrado en la pared oeste es de 17,4 kWh/m<sup>2</sup> en Beijing (verano).

Por otro lado, el desarrollo de modelos simplificados con la suficiente precisión para predecir el rendimiento térmico de los sistemas APES es relevante para el campo de la simulación energética de edificios, siendo las redes térmicas de resistencias (R) y capacitancias (C) una de las representaciones más adecuadas para predecir el rendimiento térmico del APES (Zhu et al., 2014).

Se ha venido trabajado en la generación de un modelo térmico RC con parámetros optimizados mediante técnicas de algoritmos genéticos, denominado modelo “umbrella” (Hongn et al., 2022) capaz de modelar con gran precisión el núcleo de concreto donde se embeben los tubos. En un trabajo posterior, han propuesto la consideración de la transferencia de calor en dirección axial del tubo (embebido) a través de un método estacionario denominado  $\epsilon$ -NTU (Hongn et al., 2023), obteniendo finalmente un modelo semi-dinámico RC que ha demostrado un desempeño destacado.

En el presente trabajo, se analiza el impacto e influencia, desde el punto de vista termo-energético, de la integración de elementos constructivos APES, como sistema de enfriamiento, en diferentes componentes de la envolvente de una tipología constructiva tipo mono ambiente, para las condiciones meteorológicas de verano de un año típico de la ciudad de Salta.

## **METODOLOGÍA**

### *Modelación de los elementos constructivos*

Para determinar el comportamiento termo-energético integral de un edificio con un sistema APES acoplado debe utilizarse un programa de simulación global de edificios como Energy Plus o TRNSYS,

o en su defecto, modelar mediante código computacional los intercambios de calor entre los distintos elementos que interactúan térmicamente con el aire interior. Así, en este trabajo, se generó un modelo integral mediante el entorno de programación Python. El mismo, se basa en la analogía de resistencias y capacitores eléctricos, modelo RC en una dimensión, para definir la interacción térmica entre los elementos constructivos que componen el edificio.

A continuación, se define el modelado de tres tipos de elementos constructivos:

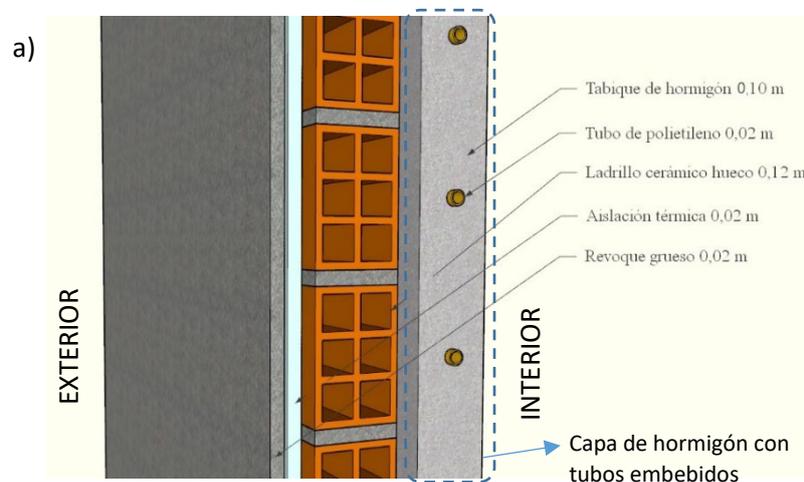
**Elementos masivos:** sistemas o capas constructivas que tienen la capacidad de acumular calor, por lo que se considera el efecto de conducción y acumulación térmica en el material. Fig. 1a.

**Elementos no masivos:** sistemas o capas constructivas que tienen una capacidad de acumulación de calor despreciable por lo que sólo se considera el efecto conductivo a través del material. Ej: vidrios, capas de aislación. Fig. 1b.



Figura 1: Modelado de elementos o capas constructivas comunes: a) 2RIC para masivos, b) 1R para no masivos.

**Núcleo de Hormigón del APES:** Este sistema tiene una modelación especial, estudiada en profundidad en trabajos anteriores donde se ha obtenido un modelo semi-dinámico que mostró un desempeño muy aceptable (Hongn et al., 2023). El tabique de hormigón contiene una fuente/sumidero de calor representada por los tubos embebidos en el mismo. Este tabique puede acoplarse a otras capas constructivas para formar un sistema constructivo heterogéneo con capacidad de absorber o liberar calor mediante la activación del sistema, lo que se conoce sistema APES, Fig. 2.





m. La envolvente cuenta con tres ventanas de vidrio simple (0,003 m de espesor) ubicadas sobre pared este, norte y sur (baño), la primera de 1 m x 1,5 m, la segunda de 1 m x 1 m y la última de 0,4 m x 0,2 m. Se considera la presencia de cortinas en las ventanas del ambiente principal, lo que disminuye el coeficiente de transmitancia solar de las mismas. Todas las superficies presentan una capa de aislación térmica de 0,02 m del lado exterior. Estas características definen el caso base del edificio estudiado.

### Consideraciones para la simulación

La simulación térmica se realizó considerando una zona térmica, sin ganancias de calor internas y renovaciones constantes de aire por hora. Se asumieron las siguientes condiciones:

- Transferencia de calor unidimensional en paredes.
- La transferencia de masa (humedad) no se considera en los cálculos.
- Las paredes y techo están expuestos a la radiación solar. Se utilizó un coeficiente de absorción solar de paredes y techo de 0,5.
- Las superficies exteriores, techo y paredes, están expuestas al viento y a la radiación solar. Para la determinación del intercambio de calor entre las superficies y el ambiente exterior se utiliza el concepto de Temperatura sol-aire.
- Coeficientes fijos de transferencia de calor convectivos/radiativos  $h$ : 6 y 12 W/m<sup>2</sup>-K para paredes lado interior y exterior respectivamente, 8,5 y 12 W/m<sup>2</sup>-K para el elemento con APES (paredes) lado interior y exterior respectivamente y, 10,5 (interior) y 12 W/m<sup>2</sup>-K (exterior) para el caso del APES en techo. Además, Se consideraron 4 renovaciones de aire por hora (RAH) para toda la simulación.
- Para considerar la transferencia de calor conductiva con el suelo, el elemento “piso” posee una capa extra, definido como tierra (1 m de espesor) conectado a un nodo de temperatura constante (21 °C).
- Se considera que el agua, al salir del sistema APES, se enfría en un sumidero térmico tipo intercambiador geotérmico, por lo que la temperatura del agua decrece hasta la temperatura del suelo a una profundidad de 1,5 m, considerada como la media estival exterior de 21°C.
- Algoritmo de cálculo EDO (ecuaciones diferenciales ordinarias), compatible con la modelación RC.

La metodología plasmada en el código generado en Python sigue los siguientes pasos generales:

1. Definición de condiciones iniciales o inputs: Datos meteorológicos de archivo epw, cálculo de temperatura sol-aire para todas las superficies de la envolvente, temperaturas iniciales (semilla) para los nodos de temperatura de la red térmica.
2. Resolución en simultáneo de las ecuaciones de transferencia de calor para cada elemento o nodo del sistema. Se resuelve el sistema de ecuaciones, mediante la librería ODEINT de Scipy, cuyo nodo central es el del aire interior (única zona térmica) correspondiente a la siguiente ecuación de balance de energía:

$$\rho C_p V \frac{dT_{aire,in}}{dt} = Q_{paredes} + Q_{ventanas} + Q_{piso} + Q_{techo} + Q_{solar} + Q_{infil} + Q_{APES} \quad (1)$$

$\rho$ : Densidad del aire, kg/m<sup>3</sup>

$C_p$ : Calor específico del aire, kJ/kg°C

$V$ : Volumen del aire en el espacio interior, m<sup>3</sup>

Donde  $Q_{paredes}$ ,  $Q_{ventanas}$ ,  $Q_{piso}$  y  $Q_{techo}$  es el calor (W) intercambiado mediante los componentes de la envolvente, que a su vez interactúan térmicamente con el exterior.  $Q_{solar}$  es la ganancia solar a través de las superficies vidriadas (considerando la presencia de la cortina),  $Q_{infil}$  es la tasa de energía intercambiada mediante las infiltraciones de aire y  $Q_{APES}$  es el calor intercambiado mediante el sistema APES, cuya formulación se encuentra en el trabajo previo ya mencionado.

3. Obtención de series (conjunto de datos de salida como temperaturas y tasas de flujo de calor) para cada paso temporal de 1 h.
4. Generación de archivos y post procesamiento de datos: cálculo de temperatura operativa y confort térmico.

## RESULTADOS

### *Análisis dinámico de transferencia de calor*

La Fig. 4 (a) muestra el flujo de calor en la superficie interna la pared orientada al oeste, donde se observa el efecto de enfriamiento del sistema, la temperatura de esta superficie cae en promedio alrededor de  $2,5^{\circ}\text{C}$  entre el caso base y el caso considerado, lo que indica que la temperatura radiante media (MRT) es menor. Por tanto, los tubos integrados en este elemento pueden no solo reducir la carga de refrigeración, sino también mejorar el confort térmico. Como se muestra en la Fig. 4 (b), el flujo de calor interno se reduce notablemente durante todo el periodo de verano ya que la mayor parte del tiempo el sistema APES absorbe calor del interior del monoambiente. Debido al efecto dinámico de almacenamiento térmico de los materiales, hay momentos (de corta duración y frecuencia) en donde el sistema radiante aporta calor hacia el interior. En este contexto, en promedio para el periodo de verano, la pared sin APES aporta  $3.74 \text{ W/m}^2$  mientras que para un sistema radiante sucede lo contrario, removiendo en promedio para el mismo periodo un  $-9.43 \text{ W/m}^2$  (el negativo indica calor absorbido por el lado interior de la superficie, extraído del ambiente interno).

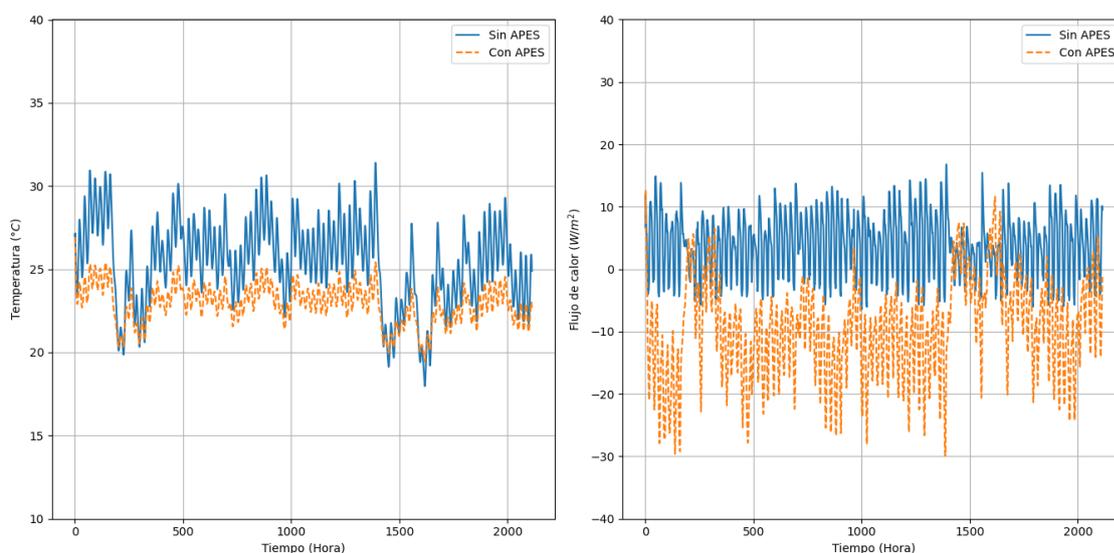


Figura 4: Pared oeste con/sin APES integrado, a) temperaturas superficiales interiores y b) flujo de calor superficial interior.

### *Efecto de las orientaciones*

El rendimiento del sistema radiante aplicado a diferentes orientaciones, en la ciudad de Salta Capital, se muestra en Fig. 5. Cada orientación mencionada implica integrar ese elemento particular con el sistema APES, manteniendo las superficies restantes sin cambios (versión original o base). Así, el calor cedido/removido al/desde el espacio interior se ve significativamente afectado por la incidencia de radiación solar.

A partir del agua circulando por los tubos embebidos en el elemento constructivo, la transferencia de calor externa se reduce notablemente y la ganancia de calor en las envolventes integradas con APES en cada condición es negativa, lo que significa que la superficie eliminará el calor del espacio interior y no lo contrario.

Además, al comparar el flujo de calor del techo (horizontal) este pasa de aportar más calor, en el caso base con una cantidad de calor aportado de  $12,9 \text{ MJ/m}^2$  para todo el periodo, a remover unos  $5,3 \text{ MJ/m}^2$  en el caso con APES integrado sobre la cubierta (menor absorción que los otros escenarios). La diferencia en la cantidad de calor absorbido entre las orientaciones verticales se hace más pequeña, lo que significa que la capacidad de remoción de calores influenciada por el entorno exterior en menor medida. La situación es más favorable para el caso con el APES del lado soleado; por ejemplo, la reducción de calor en el lado oeste es un 10% mayor que en el lado sur. Esto se puede interpretar además de la magnitud y dirección de las barras en el gráfico de la Fig. 5.

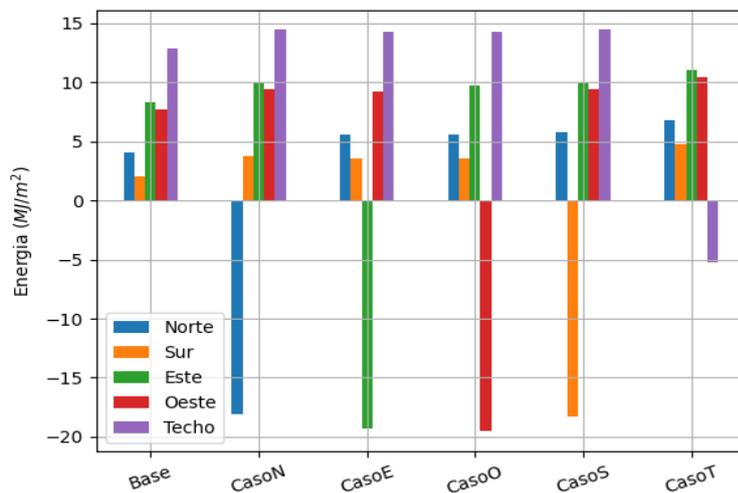


Figura 5: Energía (promedio para el periodo de verano) absorbida/cedida al ambiente interior por las envolventes sin APES y con APES, integrado en sólo una componente de la envolvente por caso analizado.

Como se puede observar en el Fig. 6, que muestra un diagrama de caja y bigotes, el efecto de la integración del APES al techo es significativo para reducir la temperatura ambiente interior promedio durante el verano. La configuración que presenta el mejor desempeño corresponde al caso donde el APES se integra al techo, ya que las temperaturas mínimas, máximas y medias se desplazan hacia abajo en el gráfico, acercándose al rango de temperaturas de confort térmico.

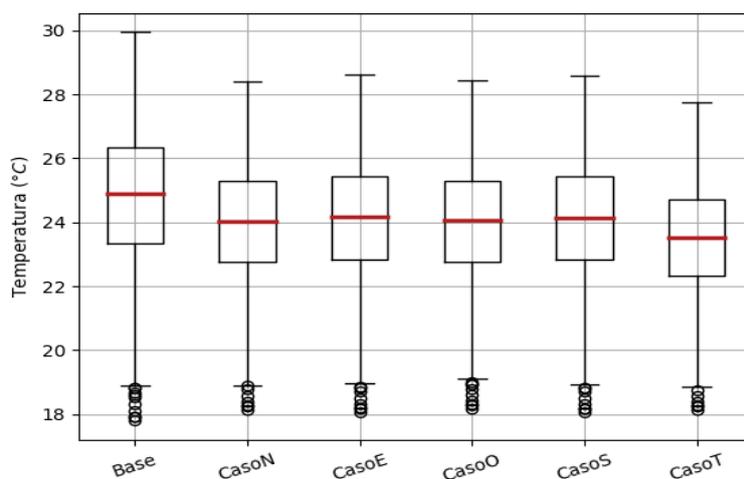


Figura 6: Gráfico de cajas y bigotes para las temperaturas del ambiente interior, para los distintos casos analizados.

### Análisis de confort térmico

El criterio de ASHRAE Standard 55, para determinar el nivel de confort, se basa en el modelo PMV (Voto Medio Predicho) y PPD (Porcentaje de personas en insatisfacción). Se establecen rangos según los valores de PMV, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Valores definidos para PMV según ASHRAE 55.

+3	Caliente
+2	Cálido
+1	Ligeramente cálido
0	Neutral
-1	Ligeramente fresco
-2	Fresco
-3	Frío

El PMV es una medida que indica el grado de satisfacción de las personas con la temperatura ambiental. Este se calcula a partir de variables como la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del viento y la actividad metabólica de las personas. Mientras que el PPD se refiere a la proporción de individuos que se sienten incómodos o molestos por el calor o el frío. Este porcentaje puede variar según diversos factores, como el clima, la estación, la actividad física, la vestimenta, la humedad y la ventilación.

Para mostrar de manera más clara el efecto del sistema radiante propuesto sobre el confort térmico, se compara el monoambiente con sus envolventes sin aislación, caso 0, para luego contrastarla con los otros casos ya analizados (base y mejor caso). De esta forma, se puede apreciar cómo el sistema radiante mejora las condiciones térmicas de la vivienda, reduciendo la demanda energética y aumentando el bienestar de los ocupantes. Para ello se analiza la primera semana de nuestros datos. Mediante el uso de la librería *pythermalcomfort*, se calculan los índices de confort térmico.

Como se puede ver en la Fig. 7, el caso sin aislación térmica, presenta valores de PMV elevados desde el mediodía hasta la noche para la semana, lo que indica que hay una sensación térmica de calor y un nivel de incomodidad alto. El porcentaje de personas insatisfechas varía entre el 20% y el 80%, lo que significa que la mayoría de los ocupantes no se sienten confortables con las condiciones ambientales.

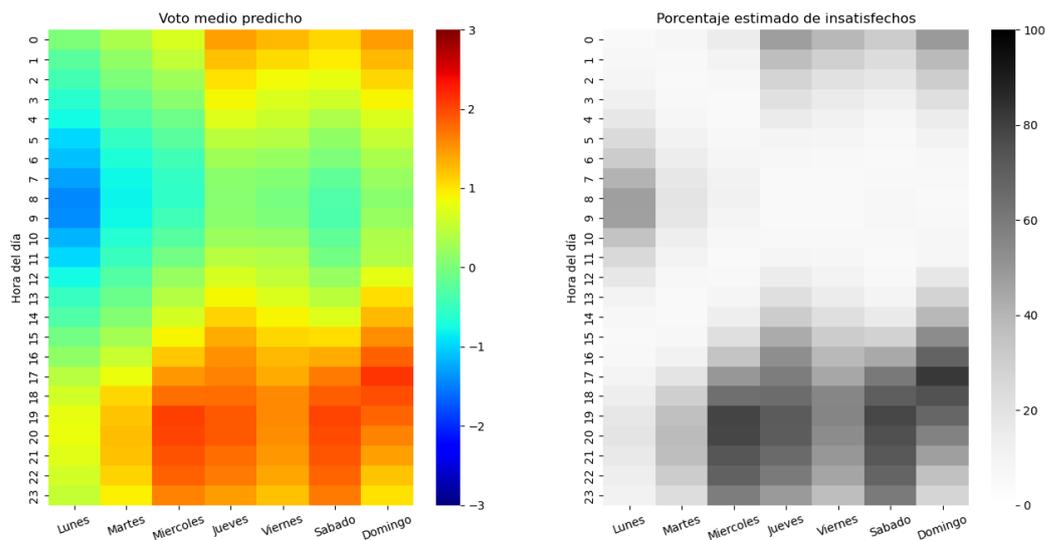


Figura 7: PMV y PPD para el caso 0 (envolvente sin aislación y sin APES).

La aislación térmica (caso base) tiene un efecto significativo en el confort térmico de los ocupantes, según se muestra en los indicadores PMV y PPD. Al analizar el caso base con aislación, Fig. 8, se aprecia que los valores de PMV y PPD disminuyen notablemente, lo que implica una menor sensación de incomodidad térmica. Sin embargo, se observa que, a partir del miércoles, el PPD fluctúa entre el 20% y el 40%, lo que indica que hay un rango de variabilidad en la percepción térmica de las personas.

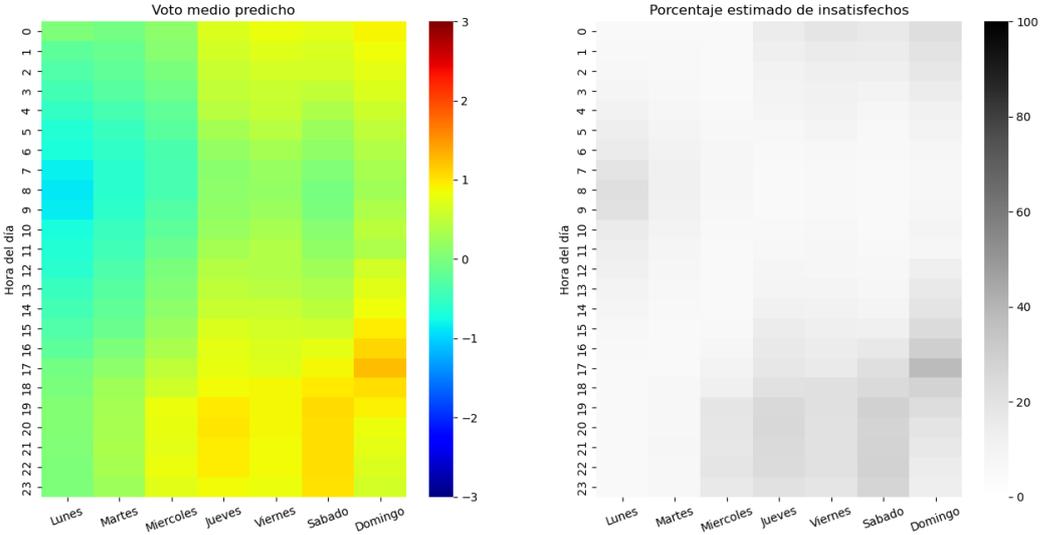


Figura 8: PMV y PPD para el caso base (envolvente aislada y sin APES).

En el último caso, Fig. 9, se considera que todas las paredes tienen aislamiento térmico y el techo con sistema APES. El PPD no supera el 20% en este escenario. Esto significa que la mayoría de las personas se sentirían cómodas con la temperatura interior.

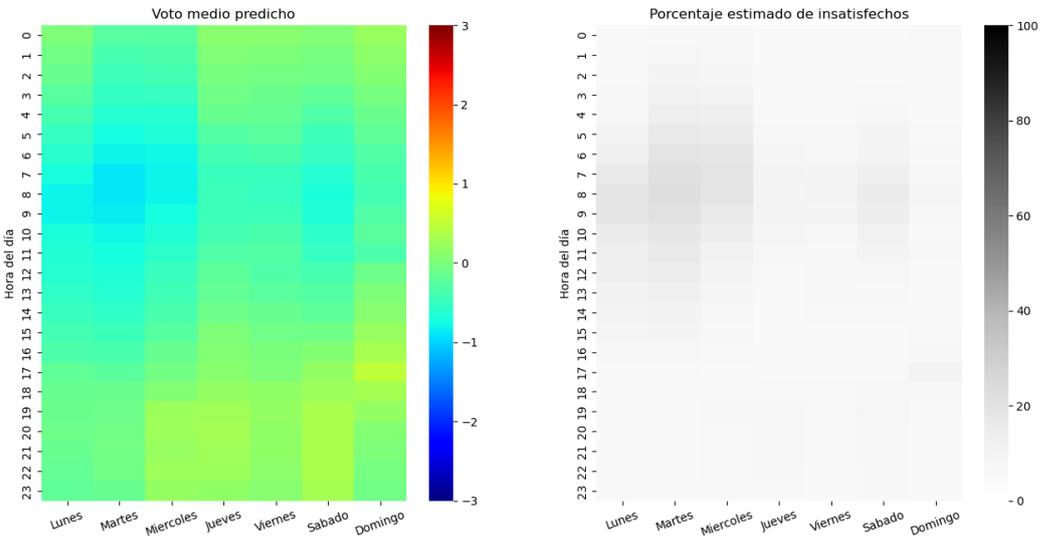


Figura 9: PMV y PPD para el caso modificado, con el sistema APES integrado en techo.

**CONCLUSIONES**

La estructura de red térmica RC propuesta para el sistema APES, el componente de mayor complejidad en la modelación RC, ha comprobado reflejar de manera fiable el comportamiento térmico del mismo (Hongn et al., 2023). A partir de este modelo, se generó el sistema de ecuaciones para considerar las interacciones térmicas entre los componentes de un edificio completo y el aire interior de la zona térmica

(nodo principal en una red térmica global), integrando el sistema radiante APES en los elementos de la envolvente. El aporte del APES se ve reflejado en la reducción de las cargas térmicas de enfriamiento.

En base a los resultados obtenidos, se concluye lo siguiente:

(1) Mediante la integración de los sistemas APES, la temperatura de la envolvente edilicia disminuye y la mayor parte de la radiación solar puede ser absorbida por el agua de refrigeración circulando mediante el sistema radiante, en lugar de transferirse a la habitación. Por lo tanto, la carga de refrigeración real se reduce durante los días de verano, casi en la totalidad del periodo.

(2) La disminución en las temperaturas superficiales interiores de las envolventes, influye en la mejora del confort térmico al reducir TMR y por ende la temperatura operativa.

Como trabajo futuro, se analizará el comportamiento termo-energético de estos sistemas radiantes de climatización para diferentes tipologías constructivas, bajo diferentes condiciones climáticas y se ahondará en el estudio del intercambiador de calor geotérmico, fundamental como sumidero térmico, desde la simulación y experimentación.

## REFERENCIAS

Hassan, M. A. y Abdelaziz, O. (2020). Best practices and recent advances in hydronic radiant cooling systems – Part II: Simulation, control, and integration. *Energy and Buildings*, 224, 110263.

Henze, G.P., Felsmann, C., Kalz, D.E., Herkel, S. (2008). Primary energy and comfort performance of ventilation assisted thermo-active building systems in continental climates. *Energy & Buildings* 40, 99-111.

Hongn, M., Bre, F., Valdez, M., y Flores Larsen, S. (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., González, S. (2023). Modelo semi-dinámico para la determinación del comportamiento térmico de sistemas radiantes de tubos embebidos. *Energías Renovables y Medio Ambiente* 50, 13-21.

International Energy Agency IEA (2021). *World Energy Outlook 2022*, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>

Krajčičk, M., Arıcı, M., Šikula, O. y Šimko M. (2021). Review of water-based wall systems: Heating, cooling, and thermal barriers. *Energy & Buildings* 253, 111476.

Lehmann, B., Dorer, V., y Koschenz, M. (2007). Application range of thermally activated building systems TABS. *Energy & Buildings* 39, 593-598.

Romaní J., Belusko M., Alemu A., Cabeza L., de Gracia A., Bruno F. Control concepts of a radiant wall working as thermal energy storage for peak load shifting of a heat pump coupled to a PV array. *Renewable Energy* 118 (2018), 489-501.

Shen, C. y Li, X. (2016). Dynamic thermal performance of pipe-embedded building envelope utilizing evaporative cooling water in the cooling season. *Applied Thermal Engineering* 106, 1103-1113.

Strand, R. K. (2022). Recent energy simulation model enhancements for radiant systems. *Energy & Buildings* 268, 112237.

Zhu, Q., Xu, X., Wang, J. y Xiao F. (2014). Development of dynamic simplified thermal models of active pipe-embedded building envelopes using genetic algorithm. *International Journal of Thermal Sciences* 76, 258-272.

## **THERMAL PERFORMANCE OF COOLING RADIANT SYSTEM WITH EMBEDDED PIPES INTEGRATED INTO A BUILDING ENVELOPE A BUILDING ENVELOPE**

**ABSTRACT:** Thermally Activated Embedded Tube Systems (APES) can be coupled to low enthalpy sources/sinks to reduce energy consumption, electrical demand peaks, and energy costs associated with building retrofits without resigning the desired levels of interior comfort. Due to its dynamic nature and significant thermal inertia, the implementation of models that accurately represent the thermal behavior of these systems is required. For this reason, a RC model called "umbrella" is implemented, previously obtained by the authors, to simulate the influence of an APES system integrated into a building. The energy performance of the APES coupled with the different components of the building envelope with insulation is evaluated for a studio apartment in Salta for the summer period. It is observed that the inclusion of the radiant system significantly reduces the thermal cooling load when it is integrated into the sunny components of the envelope, especially the roof, with a more significant impact on the interior ambient temperature, with an average value in the summer period of 24.9°C for the base case and 23.5°C for the mentioned case.

**Keywords:** APES, radiant systems, bioclimatic conditioning of buildings, energy efficiency.