

## **ESTUDIO COMPUTACIONAL DE UN SISTEMA DE ACUMULACIÓN ESTRUCTURAL ORIENTADO A REFRESCAMIENTO BIOCLIMÁTICO: PRIMEROS RESULTADOS**

**Federico Montenegro, Marcos Hongn<sup>1</sup>**

INENCO – Universidad Nacional de Salta – CONICET - Avda. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina  
Tel. 0387-4255424 – Fax: 0387-4255389  
E-mail: marcoshongn@gmail.com

**RESUMEN:** Frente al elevado consumo energético del sector edilicio y a fines de mitigar el estrés térmico considerando las proyecciones climáticas futuras poco favorables, en particular para la región Noroeste de Argentina, los sistemas de activación térmica (TABS) constituyen una potencial estrategia bioclimática. Para determinar el desempeño termo-energético de estos elementos constructivos, su influencia en el comportamiento térmico del edificio en general y definir las condiciones de control y operación más adecuadas, es necesario implementar modelos computacionales que puedan captar de manera precisa la transferencia de calor a través de estos sistemas. Se presenta un modelo físico-computacional basado en el método numérico de Diferencias Finitas Implícito y programado en lenguaje Python. El mismo fue validado frente a datos experimentales recopilados de la bibliografía, obteniéndose un buen grado de ajuste para los resultados simulados. El mayor valor del error cuadrático medio normalizado fue de 11 %. Por otro lado, mediante un estudio paramétrico, se determinó que los factores más influyentes en la capacidad de enfriamiento del sistema son la temperatura del agua de suministro y la separación entre tubos. Se estimó que, para ciertas condiciones, un piso con TABS absorbe 1.66 MJ/m<sup>2</sup> de energía diaria extra con respecto a un piso de iguales características sin el sistema de activación térmica. En términos comparativos, el potencial de remoción de calor es de 20 a 30% mayor en un TABS superior (losa) que en uno inferior (piso).

**Palabras clave:** TABS. Modelo numérico. Estudio paramétrico. Eficiencia energética.

### **INTRODUCCIÓN**

En el plano internacional, en las últimas décadas se viene abordando la problemática referida al consumo energético y la emisión de gases de efecto invernadero. En la actualidad, de acuerdo al último informe anual de la Agencia de Energía Internacional (IEA, 2019), los edificios y el sector de la construcción representan el 36% del consumo final de energía, y aportan el 39% de las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas a la energía y a los procesos. En consecuencia, existe un gran potencial en la reducción del uso de energía y de las emisiones de CO<sub>2</sub>, en el sector edilicio mediante el uso de energías renovables.

El primer paso para resolver estos problemas en los edificios, es decir, los elevados consumos energéticos para reducir las cargas de enfriamiento/calefacción, es mediante la mejora de las envolventes, la gestión de las ganancias solares y la reducción de las cargas internas, entre otros. Así, la tendencia internacional es lograr edificios con energía neta cero o incluso edificios con energía neta

---

<sup>1</sup> Investigador Asistente CONICET

positiva, lo que significa que los mismos deberían al menos producir la misma energía que consumen. Esto implica la integración de las energías renovables en las construcciones, sin embargo, el desfase entre la disponibilidad de energía renovable (como la solar) y los perfiles de demanda de energía de los edificios requieren indefectiblemente sistemas de almacenamiento de energía (Romaní et al., 2018).

Dentro de las tecnologías de almacenamiento térmico, la activación de la masa térmica del edificio ha mostrado resultados prometedores (Vanhoudt et al., 2018). Los sistemas constructivos activados térmicamente TABS (*Thermally Activated Systems*) son sistemas de almacenamiento térmico integrados en las estructuras edilicias para propósitos de enfriamiento y/o calentamiento. Estos sistemas consisten en tubos o ductos, por donde circula agua o aire respectivamente, embebidos en la estructura del edificio utilizando activamente la masa térmica del mismo como depósito de energía. Así, la transferencia de calor hacia o desde los espacios interiores tiene lugar a través de las superficies del edificio como paredes (Shen y Li, 2017), pisos (Rhee y Kim, 2015), y/o techos (Leo Samuel et al., 2017). Los TABS no sólo entregan o absorben calor, sino que afectan directamente el desempeño energético de los edificios. La capacidad de operar con temperaturas superficiales reguladas puede modificar las ganancias de calor a través de estas estructuras y da lugar al intercambio de calor directo con la estructura del edificio. Las principales ventajas de estos sistemas son la elevada inercia térmica, las grandes superficies involucradas y la naturaleza radiativa, principalmente, de la transferencia de calor. La implementación de grandes superficies permite intercambiar calor en grandes magnitudes con un gradiente de temperatura relativamente bajo, convirtiendo a los TABS en una tecnología con gran potencial para el uso de fuentes de baja exergía. Además, la predominancia de la naturaleza radiativa, por sobre los otros mecanismos de transferencia de calor, permite: mejorar las condiciones de confort, un mejor manejo de las temperaturas operativas y reducir los ruidos y corrientes de aire causados por la ventilación (Romaní et al., 2016).

La gran inercia térmica de los sistemas TABS presentan efectos dinámicos que son difíciles de considerar usando condiciones estacionarias, es por ello que se requiere de cálculos en estado transitorio para el análisis del comportamiento térmico y dimensionamiento de estos sistemas (Antonopoulos et al., 1997; Yu et al., 2014). Los modelos de simulación deben tener en cuenta la convección del fluido a la losa, la conducción a través de la losa y tanto la convección como la radiación en las superficies en contacto con los ambientes (interior y exterior). En este contexto, el calor intercambiado con las habitaciones es el principal parámetro a obtener mediante simulación. Sin embargo, para estudiar las condiciones de confort y evaluar los problemas de condensación, es necesario obtener la temperatura promedio de la superficie o la distribución de la temperatura. Existen varios tipos de modelos para determinar el comportamiento térmico-energético del sistema, muchos de ellos se incluyeron en el trabajo de revisión de Romaní et al. (2016). Los autores establecen que los métodos numéricos como los de elementos finitos (FEM) y diferencias finitas (FDM) pueden describir los procesos de transferencia de calor y almacenamiento de energía de manera precisa.

En el presente trabajo se presentan los primeros resultados asociados a la modelación y simulación térmica de un sistema TABS de núcleo de concreto y tubos embebidos, mediante un método FDM en dos dimensiones. El modelo fue validado frente a datos experimentales recopilados de la bibliografía, para un sistema de tubos embebidos de 5 capas constructivas. Finalmente, se analizó la influencia de algunos parámetros constructivos y de funcionamiento importantes del sistema, mediante un estudio paramétrico para dos configuraciones horizontales de TABS (tubos embebidos).

## **MODELO NUMÉRICO**

Los modelos numéricos resuelven las ecuaciones diferenciales de calor limitando un conjunto de elementos finitos, puntos en la grilla, en el dominio de cálculo. En este caso se trabajó con el método de Diferencias Finitas Implícito (MDFI), que presenta la ventaja de ser incondicionalmente estable con

respecto a su homólogo, el método explícito, a costa de una mayor complejidad de implementación (Incropera y De Witt, 1996).

La figura 1 (izq.) muestra esquemáticamente la sección transversal, típica, de un techo con sistema de tubos embebidos. Los tubos pueden estar ubicados en cualquier posición, no estrictamente en el centro de la estructura. Para simplificar la transferencia de calor en la estructura y el desarrollo del modelo, se considera a esta transferencia despreciable en la dirección axial de los tubos sin introducir demasiado error sobre todo en aplicaciones prácticas (Antonopoulos et al., 1997). Esto simplifica el análisis a un problema en dos dimensiones.

En condiciones de estado transitorio, con propiedades constantes y sin generación interna, la ecuación de difusión de calor en un medio sólido esta descrita por la ec. (1).

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (1)$$

Donde  $T(t, x, y)$  es la temperatura en °C,  $t$  es la coordenada temporal (s),  $x$  e  $y$  son las coordenadas espaciales (m) y  $\alpha$  es la difusividad térmica del material ( $m^2/s$ ).

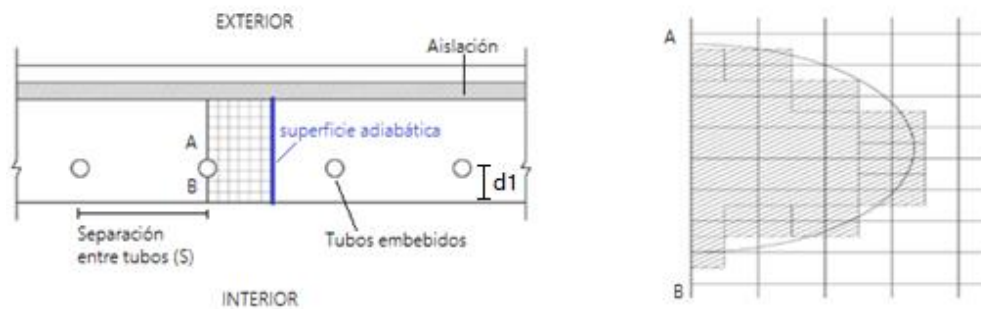


Figura 1: Esquema de la sección transversal de un TABS de tubos embebidos para un techo (izquierda) y discretización del dominio espacial en las cercanías de los tubos (derecha).

La solución numérica a la ec. (1) consiste en discretizar, mediante una red nodal, la configuración constructiva del TABS. Luego, se aplica a cada tipo de nodo de la grilla (aislados, con convección y/o radiación) la ecuación en diferencias finitas correspondiente (obtenida mediante un balance de energía y teniendo en cuenta que los lados de las cuadrículas de la grilla son iguales). Los nodos que representan la superficie circular del tubo han sido discretizados como lo indica la figura 1 (der.). Finalmente, se obtienen N ecuaciones lineales, concordante con los N nodos de la red, que se resuelven simultáneamente, teniendo en cuenta las siguientes condiciones y suposiciones:

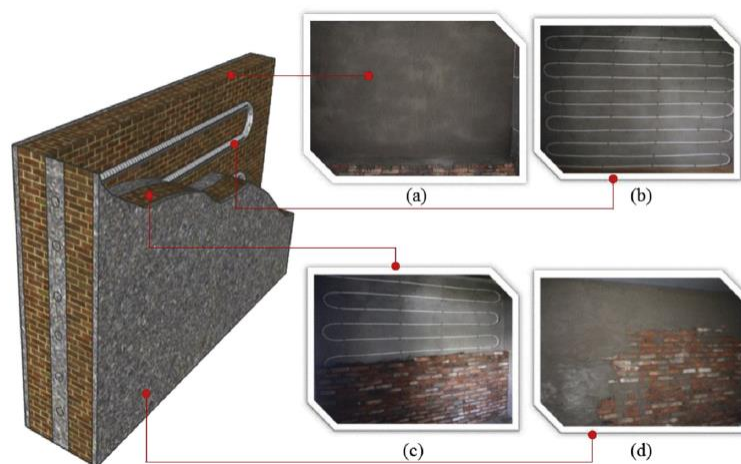
- La temperatura circular del fluido en el tubo es constante y uniforme.
- Debido a la simetría en la distribución de temperatura con respecto a los tubos, el plano equidistante entre ellos se considera adiabático.
- Se desprecia la conducción en el material del tubo (resistencia térmica despreciable frente a las resistencias de las capas del sólido).
- Transferencia de calor bi-dimensional.
- Transferencia de calor convectiva/radiativa en superficies externa e interna del sistema.

La programación del método se realizó en lenguaje computacional Python. El sistema de ecuaciones es generado a partir de los inputs necesarios: distribución de los tubos, temperatura y velocidad del fluido, ancho de los materiales que componen el sistema, distintas capas de material y sus

propiedades, y condiciones de frontera (fijas o variables en el tiempo); y la solución es obtenida mediante iteración usando el método de inversión de matrices. Los outputs del programa son: distribuciones de temperatura y flujos de calor en las superficies.

## VALIDACIÓN

Debido al contexto de pandemia de los últimos meses, no fue posible generar, aún, datos experimentales propios para aplicar y evaluar la fiabilidad del modelo propuesto. Por lo tanto, se optó por la utilización de datos experimentales hallados en la bibliografía de referencia, a fin de analizar la performance del modelo MDFI frente a datos reales de operación. El artículo presentado por Xie et al. (2015) se basa en la validación experimental de un modelo FDFD (modelo basado en análisis por Diferencias Finitas en el Dominio de la Frecuencia), por lo que contiene información experimental valiosa. Debido a la metodología descrita y los sensores utilizados para los ensayos, los resultados experimentales del trabajo mencionado cuentan con la fiabilidad suficiente para validar el modelo computacional desarrollado. Así, se replicaron las condiciones de borde (entradas del modelo) y los datos experimentales de flujos de calor  $q''$  a través del sistema TABS (salidas para la comparación directa). De la figura 2 puede observarse el TABS mencionado, un esquema de su configuración y la metodología de construcción de un sistema de tubos embebidos con disposición vertical (pared). Esta pared interactúa con dos cámaras de temperatura controlada, que representan los ambientes interno y externo. Los perfiles de temperatura de aire deseados se logran con la variación periódica de un perfil pre-seteado, mediante calentadores y controladores PID.



*Figura 2: Pared con tubos embebidos considerada para la validación del modelo: esquema y etapas constructivas. Fuente: Xie et al., 2015.*

Para determinar el grado de ajuste entre los datos simulados y medidos se determinaron los siguientes parámetros estadísticos (Taylor, 1997): error cuadrático medio (*RMSE*), el error cuadrático medio normalizado (*NRMSE*), coeficiente de correlación (*Corr*) y desvío estándar relativo (*STDr*).

### *Validación mediante flujos de calor a través de las superficies interna y externa del sistema*

Las condiciones de borde impuestas al sistema corresponden a los perfiles de temperatura del ambiente interior y exterior, en un lapso de 24 horas, que interactúan con el sistema TABS (separa ambos ambientes) y la temperatura del fluido circulante por los tubos del TABS (agua con un caudal másico constante de 8 L/min). La figura 3 muestra los valores del flujo de calor medio simulado (curva azul) frente a los valores medidos (curva naranja) sobre las superficies interna (izq.), y externa (der.) de la pared.

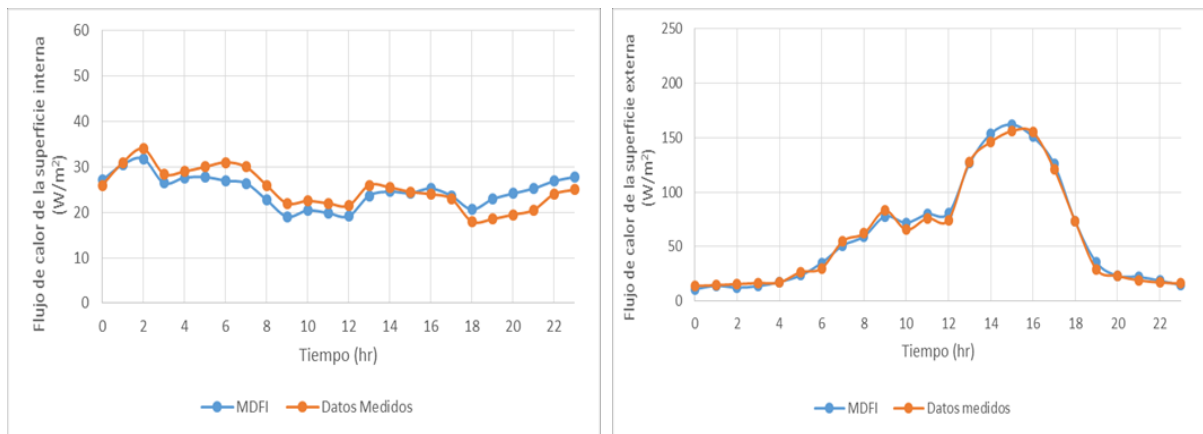


Figura 3: Flujos de calor a través de (a) superficie interna y (b) superficie externa, del sistema TABS. Valores para una temperatura de agua de suministro de 17.5 °C y una velocidad de flujo de agua de 0.5 m/s. Datos experimentales extraídos de Xie et al., 2015.

Los resultados asociados al ajuste entre las series de datos simulada y experimental se muestran en la tabla 1, donde también se han incluido algunos parámetros de ajuste obtenidos por Xie et al. en la validación de su modelo FDFD. Se consideraron coeficientes convectivo-radiativo ( $h$ ) fijos para las superficies interna y externa con valores de 7 W/m<sup>2</sup>-K y 8 W/m<sup>2</sup>-K respectivamente, un salto temporal de 300 segundos y un salto espacial de 0.005 m. Las dimensiones, las características constructivas y las propiedades de los materiales del sistema TABS fueron replicadas según el artículo de referencia.

Parámetros estadísticos	Superficie interna	Superficie externa
RMSE (W/m <sup>2</sup> )	2.69	4.06
NRMSE	11 %	7 %
STDr	0.796	1.023
Corr	0.736	0.955
Error relativo promedio *	10 % (11 % *)	9 % (7 % *)
Tasa de flujo de calor promedio para un día (W/m <sup>2</sup> )	24.78 (25.5 *)	60.50 (60.0 *)

\*Parámetros presentados por Xie et al., 2015.

Tabla 1: Parámetros estadísticos entre series de datos simulados y medidos.

De los valores observados de la tabla 1, se confirma que el grado de ajuste de la tasa de flujo de calor en la superficie exterior es muy bueno con un NRMSE de 7 % y un Corr > 0.95, figura 3b. Mientras que para la superficie interna se consigue un ajuste aceptable con un NRMSE de 11 % y un valor de Corr ~0.75, figura 3a. Como ya se mencionó, la consideración de coeficientes  $h$  invariantes en el tiempo puede constituir la principal fuente de error en los datos simulados.

## ESTUDIO PARAMÉTRICO

El rendimiento térmico y la cantidad de calor absorbido/cedido por un sistema TABS dependen de las condiciones de operación y características constructivas del mismo. Es importante, por lo tanto, llevar a cabo un estudio paramétrico para optimizar el funcionamiento del sistema. Para ello, se analizó el comportamiento térmico del TABS frente a la variación de los siguientes parámetros: la separación entre tubos (distancia entre centros,  $S$ ), el flujo volumétrico y la temperatura del agua de suministro ( $\dot{V}$  y  $T_F$ ) y la distancia entre los tubos y la superficie en contacto con el ambiente interior ( $d1$ ), ver figura 1. Se analizan sistemas TABS para dos configuraciones horizontales: piso y techo.

### Caso de Análisis I: Piso

En este caso, se supuso una losa de 0.2 m de espesor (incluyendo los tubos) y condiciones adiabáticas en la parte inferior (representa un piso), construida de hormigón común con agregados pétreos (1800 kg/m<sup>3</sup>) IRAM 11601 - calor específico 837 J/kg-K, densidad 1800 kg/m<sup>3</sup>, conductividad térmica 0.97 W/m-K; con tubos incrustados de diámetro 0.02 m. El valor del coeficiente de transferencia de calor convectivo-radiativo se fijó en 6 W/m<sup>2</sup>-K, valor típico para superficies no asoleadas. Los perfiles de temperatura periódica, introducidos en el modelo como condiciones de borde superficiales, corresponden a valores medidos en un local ubicado en el campo experimental del INENCO (temperatura ambiente interior), para el día 8 de octubre del 2018 (en dicho local se instalará el prototipo TABS). Las otras condiciones de borde fueron: temperatura fija en el agua de suministro y superficie inferior adiabática. Para las simulaciones, los saltos temporal y espacial fueron de 300 segundos y 0.005 m respectivamente.

Para comparar el desempeño del sistema, frente a las diferentes variables propuestas, se analizó la tasa de flujo de calor por unidad de área  $q''$  (W/m<sup>2</sup>) absorbida por la superficie en contacto con el aire interior de la zona a acondicionar. Así, los valores de  $q''$  fueron promediados en un lapso de 24 horas y los resultados se muestran en las figuras 4 y 5.

De la figura 4a se observa que el efecto de la distancia entre los tubos es más influyente a medida que la temperatura del agua de suministro es más baja. Para una temperatura  $T_F = 14^\circ\text{C}$ , la tasa de absorción de calor disminuye a razón de 0.36 W/m<sup>2</sup> por cada centímetro de distanciamiento entre tubos. Cuando  $T_F = 19^\circ\text{C}$  la tasa de reducción es 0.17 (W/m<sup>2</sup>) /cm. Se puede inducir, frente al comportamiento observado, que la separación adecuada, considerando también la resistencia mecánica a la torsión de los tubos, puede estar comprendida entre  $0.15\text{ m} < S < 0.2\text{ m}$ . Por otro lado, se observa una tendencia lineal entre la temperatura del agua y la tasa de calor absorbida  $q''$ . Por lo que, disminuir la temperatura del agua de 19 °C hacia un valor, razonable, de 17 °C incrementará en un 43% la tasa de absorción de calor por metro cuadrado de superficie. La figura 4b, muestra los valores de  $q''$  en función del caudal volumétrico del agua de alimentación, en L/min. Se observa una débil dependencia de este parámetro en la variación de  $q''$ .

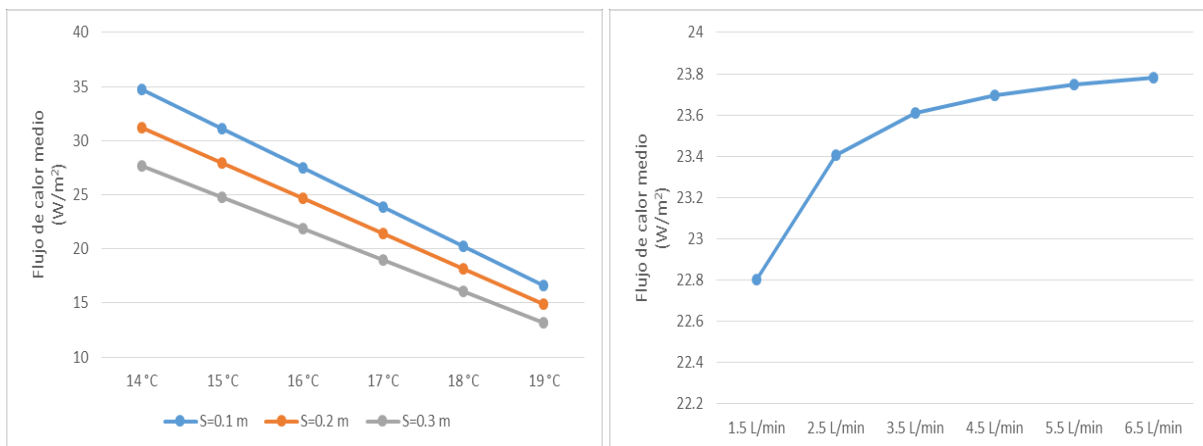


Figura 4: Flujo de calor medio absorbido por el sistema para: a) distintas temperaturas de agua de suministro y distintas distancias (S) de separación entre los tubos y b) diferentes caudales volumétricos para una temperatura del agua de 17°C, S=0.1 m y  $d_1=0.09\text{ m}$ .

De la figura 5a pueden observarse los valores de  $q''$  para dos elementos compuestos con distintos tipos de hormigón: el primero de 1800 kg/m<sup>3</sup> y el segundo de 2500 kg/m<sup>3</sup>, cuyas propiedades se indican en la norma IRAM 11601. Emplear un hormigón con mayor difusividad térmica, como el último mencionado, incrementaría en promedio un 25 % la absorción de calor con respecto al primer material, para  $0.1\text{ m} \leq S \leq 0.3\text{ m}$ . Los resultados se obtuvieron para  $d_1 = 0.09\text{ m}$ . Por otro lado, la figura 5b

indica que mientras más cercanos se encuentren los tubos a la superficie superior, mayor es la capacidad de enfriamiento. Por ejemplo, al comparar la situación donde los tubos se encuentran a  $d1 = 0.09 \text{ m}$  (prácticamente en la mitad del espesor del piso) la tasa de calor removida desde el aire interior es de  $q'' = 23.84 \text{ W/m}^2$ . Ubicar los tubos más cerca de la superficie, por ejemplo  $d1 = 0.06 \text{ m}$  dará lugar a un incremento en la capacidad de enfriamiento de 12.6%.

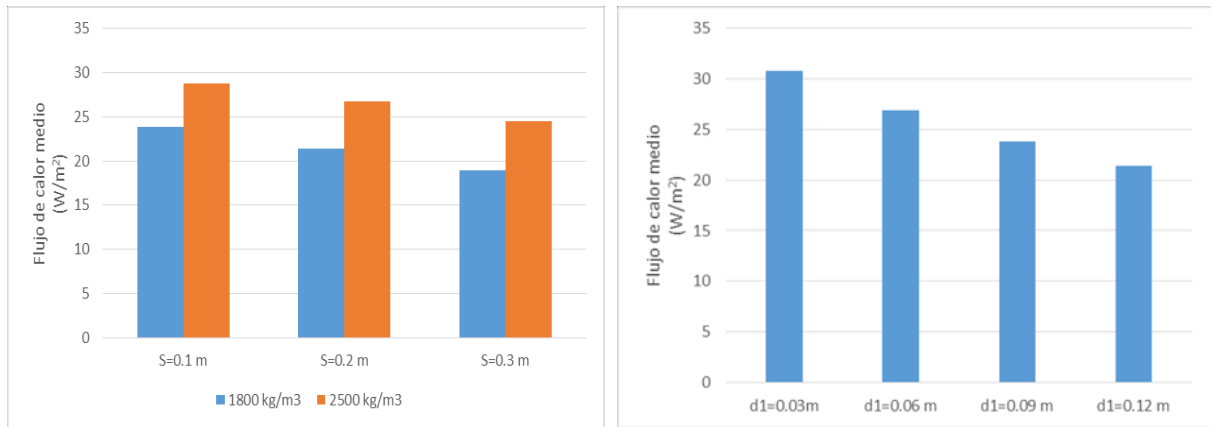


Figura 5: Flujo de calor medio absorbido por el sistema para: a) distintos tipos de hormigón y b) tubos instalados a diferentes profundidades dentro del material. Para  $S=0.1 \text{ m}$  y temperatura de agua de suministro de  $17 \text{ }^\circ\text{C}$ .

El efecto de la presencia de los tubos embebidos, en cuanto a la transferencia de calor, puede apreciarse a partir de la figura 6. Para valores de  $S = 0.3 \text{ m}$ ,  $T_F = 17 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $d1 = 0.09 \text{ m}$ , se estima una tasa de remoción de calor  $q''$  (promedio en todos los nodos superficiales en contacto con el aire interior) de  $18.96 \text{ W/m}^2$ , mientras que para la misma configuración de piso pero sin el sistema de tubos la tasa de remoción de calor es incluso negativa ( $-0.20 \text{ W/m}^2$ ). Esto indica una diferencia, en la energía diaria removida, de  $1.66 \text{ MJ/m}^2$ . Este último valor indica que el piso, en términos medios, cedería calor al aire interior. La curva naranja, en figura 6 no alcanza valores negativos, por lo que el sistema TABS absorbería calor del ambiente interior durante todas las horas del día.

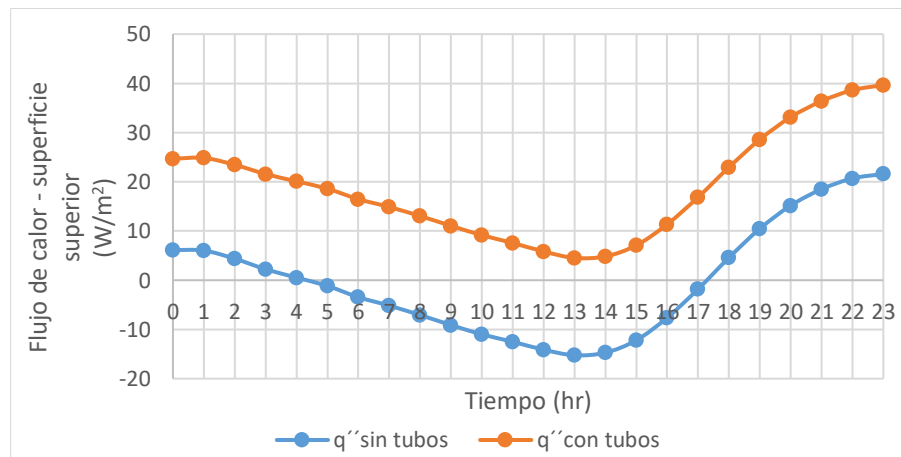


Figura 6: Flujo de calor a través de la superficie en contacto con el aire interior, comparación entre un piso común y un piso con sistema TABS ( $S = 0.3 \text{ m}$ ,  $T_F = 17 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $d1 = 0.09 \text{ m}$ ).

### Caso de Análisis II: Techo

Para comprender con más detalle el comportamiento térmico de un TABS es necesario mostrar la distribución de temperatura en su interior, para ello se modeló un techo de losa con las siguientes propiedades: conductividad térmica  $1.71 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , densidad  $2234 \text{ kg/m}^3$  y calor específico  $1160 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ . La superficie superior se encuentra expuesta a convección y radiación solar y se consideró una

absortancia solar de 0.3, mientras que la superficie inferior intercambia calor con el aire interior por convección. Los datos de temperaturas e irradiancia corresponden a las series de datos mencionadas con anterioridad. La distribución de temperaturas, para diferentes distanciamientos entre tubos y temperaturas de agua de suministro, se observan en las figuras 7 y 8, para las 2:00 pm (pico de temperatura externa).

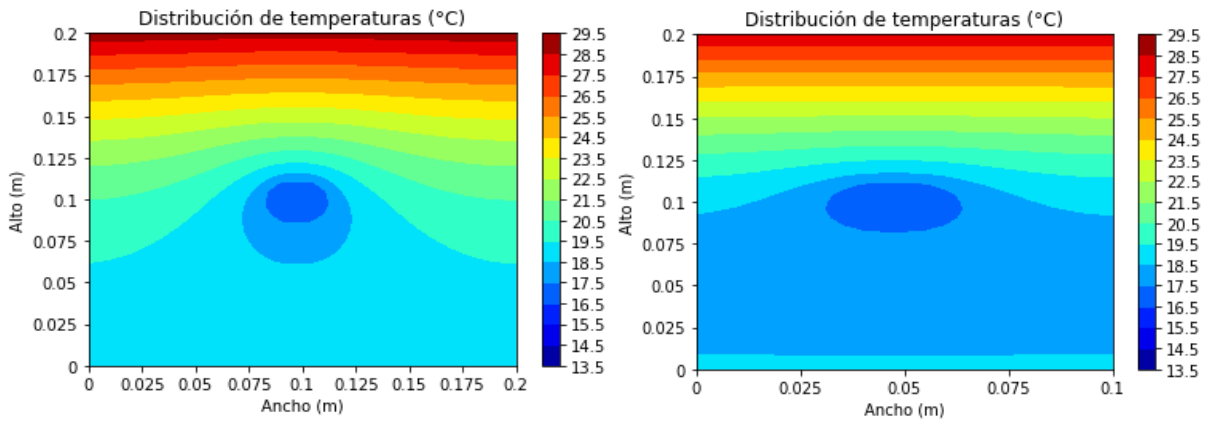


Figura 7: Distribución de temperatura para un sistema para  $S=0.2$  m (izq.) y  $S=0.1$  m (der.), para una temperatura de agua de suministro de  $17$  °C.

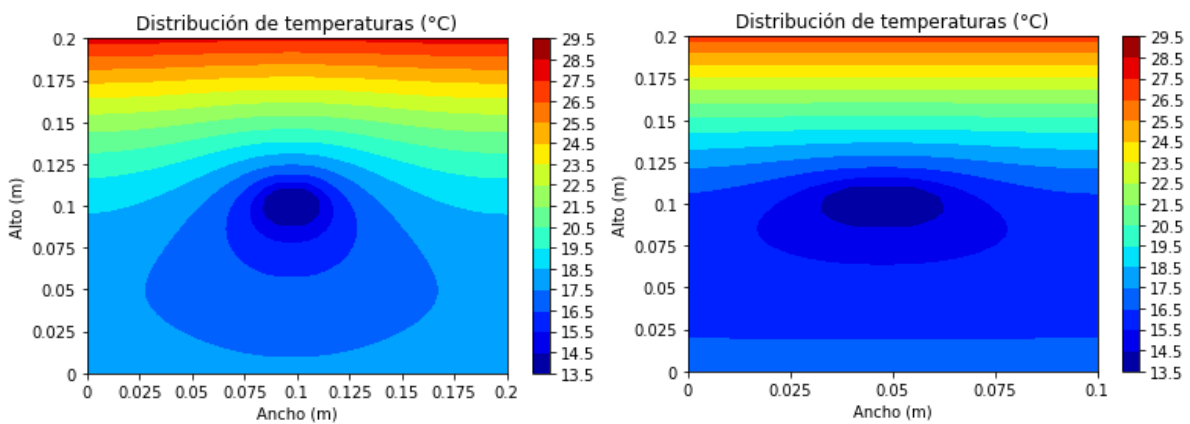


Figura 8: Distribución de temperatura para un sistema para  $S=0.2$  m (izq.) y  $S=0.1$  m (der.), para una temperatura de agua de suministro de  $14$  °C.

De las figuras 7 y 8, se aprecia que la distribución de temperatura en las superficies externa e interna es uniforme, esto presenta una ventaja a la hora de controlar la absorción de calor y evitar la condensación en la superficie interior. Además, el gradiente de temperatura en la mitad superior de la losa es bastante mayor que en la sección inferior, esto es debido a la influencia de la temperatura exterior y la irradiancia. El sistema actúa de barrera térmica disminuyendo el efecto de las condiciones externas en el ambiente interior. La temperatura promedio diaria para la superficie inferior es de  $20$  °C cuando  $T_F = 17$  °C (figura 7), y un valor promedio de  $18.5$  °C cuando el agua de suministro tiene una temperatura  $T_F = 14$  °C (figura 8). La diferencia entre ambas medias es de  $1.5$  °C, para un  $\Delta T_F = 3$  °C.

#### Análisis comparativo: piso vs techo

Como último análisis comparativo se simuló el comportamiento de la misma configuración de losa con tubos embebidos descrita en el apartado anterior. Los promedios diarios de los valores de  $q''$  absorbido por el sistema en sus dos configuraciones: piso y techo, se resumen en la tabla 2. Los



coeficientes convectivos han sido extraídos de Olesen et al. (2000), estos varían según la posición del elemento constructivo (la componente radiativa de  $h$  se mantiene prácticamente constante).

	Techo $h=11 \text{ W/m}^2$	Piso $h=7 \text{ W/m}^2$	Diferencia
$T_f = 17 \text{ }^\circ\text{C}$	$q''$		
$S=0.2 \text{ m}$	$35 \text{ W/m}^2$	$29.4 \text{ W/m}^2$	$5.6 \text{ W/m}^2$
$S=0.1 \text{ m}$	$41.7 \text{ W/m}^2$	$32 \text{ W/m}^2$	$9.7 \text{ W/m}^2$
$T_f = 14 \text{ }^\circ\text{C}$	$q''$		
$S=0.2 \text{ m}$	$52.2 \text{ W/m}^2$	$42.8 \text{ W/m}^2$	$9.4 \text{ W/m}^2$
$S=0.1 \text{ m}$	$60.4 \text{ W/m}^2$	$46.6 \text{ W/m}^2$	$13.8 \text{ W/m}^2$

Tabla 2: Valores medios diarios de  $q''$  para un piso y un techo, bajo la misma configuración constructiva (tubos en el centro del elemento).

De acuerdo a la tabla 2, el techo aumenta entre un 20 % y 30% la remoción de calor en comparación al piso, esto se justifica debido el favorecimiento de las celdas convectivas debido a la menor temperatura de la superficie del techo en contacto con el aire interior, *loop convectivo*. Esto incrementa la convección y por lo tanto la remoción de calor.

## CONCLUSIONES

Para estudiar el comportamiento termo-energético de una tecnología prometedora basada en sistemas constructivos térmicamente activados, particularmente los de núcleo de concreto con tubos embebidos, se presentó un modelo numérico (MDFI) para la solución de la ecuación de difusión de calor transitorio en 2-D en lenguaje Python. Se modelaron y simularon dos configuraciones constructivas: una pared de cemento y ladrillo (vertical) y elementos constructivos horizontales como pisos y techos de losa (tubos embebidos) expuestos a condiciones de temperatura (y radiación solar para el techo) periódicas. La primera configuración fue utilizada para validar el modelo frente a datos experimentales. Según los parámetros estadísticos calculados, el grado de ajuste es aceptable. Al comparar el flujo de calor a través de la superficie exterior del TABS, se obtuvo un NRMSE de 7 % entre datos simulados y medidos; en cuanto a la superficie interior, el NRMSE calculado fue de 11 %. Estas diferencias podrían disminuir al ajustar los coeficientes convectivo-radiativo a partir de los datos de flujo de calor y temperaturas sobre la pared y el aire interno.

Mediante la segunda configuración del sistema, se llevó a cabo un análisis paramétrico para determinar las variables influyentes en el comportamiento térmico del TABS. De este estudio se observó que la separación entre los tubos  $S$  y la temperatura de agua de suministro  $T_F$ , para un determinado material de construcción, corresponden a los parámetros con mayor peso en el incremento de la transferencia de calor en la interface entre el ambiente interior y el elemento constructivo. Desde el punto de vista meramente térmico, minimizar la separación entre tubos ( $S$ ) y la profundidad donde se instalan los mismos dentro del sistema ( $d_1$ ) maximiza la remoción de calor del local a enfriar. Debido a las limitaciones constructivas y mecánicas de los materiales, se proponen los siguientes rangos como óptimos:  $0.15 \text{ m} \leq S \leq 0.20 \text{ m}$  y  $0.05 \text{ m} \leq d_1 \leq 0.09 \text{ m}$ . Por otro lado, en un modelo bidimensional, el flujo volumétrico influye muy poco en la tasa de calor absorbido por el TABS. En la práctica y según la consideración del modelo (transferencia de calor despreciable en la dirección  $z$ ), el flujo circulante de agua por los tubos debe ser tal que asegure una variación pequeña en la temperatura del fluido entre la entrada y salida, se recomienda por lo tanto alcanzar las condiciones de flujo turbulentas.

De la distribución de temperaturas de un TABS ubicado en la envolvente superior (techo) se observó el efecto de barrera térmica del sistema. No resultó significativa la influencia del parámetro  $S$  en las temperaturas medias diarias de la superficie inferior. Considerando una separación entre tubos de 0.1 m y 0.2 m, la diferencia encontrada en las medias de temperaturas, de la superficie en contacto con el

aire interior, fue menor a 1°C. Por otro lado, variar la temperatura del agua de 17 °C a 14 °C, para  $S = 0.1 \text{ m}$ , da lugar a una diferencia entre estas temperaturas medias de 2 °C aproximadamente.

Del análisis comparativo entre TABS horizontales superior e inferior, la mejor opción para el refrescamiento de un ambiente es el techo de losa con los tubos embebidos, ya que este sirve de barrera térmica contra las condiciones meteorológicas exteriores. Además, cuenta con un mayor potencial de remoción de calor, entre un 20 y 30%, que un piso de las mismas características.

Como trabajo futuro se prevé ampliar los estudios paramétricos para lograr las condiciones constructivas óptimas según la tipología del TABS. Además, se pretende adaptar los códigos computacionales y los resultados para que puedan ser implementados en las herramientas de simulación de edificios pertinentes.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado en el marco de los proyectos ANPCYT PICT 2018-04124 y CIUNSa N° 2575.

## REFERENCIAS

- Antonopoulos K, Vrachopoulos M, Tzivanidis C (1997). Experimental and theoretical studies of space cooling using ceiling-embedded piping. *Appl. Therm. Eng.* 17, 351–367.
- Incropera F, De Witt D (1996). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 4th Ed. John Wiley & Sons, Inc., New York
- International Energy Agency (2019). 2019 Global Status Report for Buildings and Construction. ISBN No: 978-92-807-3768-4.
- Leo Samuel DG, Shiva Nagendra SM, Maiya MP (2017). Feasibility analysis of passive thermally activated building systems for various climatic regions in India. *Energy and Buildings* 155, 352–63.
- Romaní J, Belusko M, Alemu A, Cabeza L, de Gracia A, Bruno F (2018). 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, 489-501.
- Romaní J, de Gracia A, Cabeza L (2016). Simulation and control of thermally activated building systems (TABS). *Energy and Buildings* 127, 22–42.
- Olesen B, Michel E, Bonnefoi F, De Carli M (2000). Heat exchange coefficient between floor surface and space by floor cooling: theory or a question of definition. *ASHRAE Transactions*, Part I.
- Shen C, Li X (2017). Energy saving potential of pipe-embedded building envelope utilizing
- Taylor J (1997). *An Introduction to Error Analysis*. Second Edition. University Science Books. California.
- Vanhoudt D, Claessens BJ, Salenbien R, Desmedt J (2018). An active control strategy for district heating networks and the effect of different thermal energy storage configurations. *Energy and Buildings* 158, 1317–27.
- Xie J, Xu X, Li A, Zhu Q (2015). Experimental validation of frequency-domain finite-difference model of active pipe-embedded building envelope in time domain by using Fourier series analysis. *Energy and Buildings* 99, 177-188.
- Yu T, Heiselberg P, Lei B, Pomianowski M (2014). Validation and modification of modeling thermally activated building systems (TABS) using EnergyPlus. *Build. Simul.* 7, 615–627.

## ABSTRACT

Considering the discouraging climate projections, thermally activated systems (TABS) represent a potential bioclimatic strategy to reduce the large energy consumption of the building sector and to mitigate the thermal stress, particularly for the Northwest region of Argentina. Computational models are a necessary tool to study the heat transfer phenomenon in TABS. They allow one to determine the thermo-energetic behavior of these systems and their influence on the thermal response of a

building, and to establish the most suitable control and operation conditions. A physic-computational model based on implicit finite difference method and implemented in a Python code is presented. Experimental data from the literature was used to validate the model, and the fit degree between estimated and measured data is considered acceptable. The maximum value of the normalized root mean squared error was 11%. In addition, a parametric study was carried out, and it was found that the most influential parameters are the temperature of the water flow and the pipe spacing. Under certain conditions, it was determined that a TABS radiant floor absorbs an additional 1.66 MJ/m<sup>2</sup> of daily energy compared to a regular floor with the same constructive characteristics but without embedded pipes. Also, it was determined that a ceiling TABS has a higher potential of heat removal, between 20 to 30%, than a floor TABS.

**KEYWORDS:** TABS. Numerical model. Parametric analysis. Energy efficiency.