

MODELO NUMÉRICO ACOPLADO PARA LA SIMULACIÓN DE ENVOLVENTES CON PCM Y VENTILACIÓN NOCTURNA CONTROLADA

COUPLED NUMERICAL MODEL FOR THE THERMAL SIMULATION OF PCM-INTEGRATED ENVELOPES AND CONTROLLED NIGHT VENTILATION

Doctorando/a:

RAMIRO ADRIÁN DITTLER

0009-0007-3215-2833

Facultad Regional Paraná, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina

ramirodittler@frp.utn.edu.ar

Director:

JUAN CARLOS ÁLVAREZ HOSTOS

Codirector:

ALEJANDRO EDUARDO ALBANESI

Resumen

El análisis computacional de envolventes edilicias que incorporan materiales de cambio de fase (PCM) constituye una estrategia clave para el diseño pasivo y la mitigación del estrés térmico en climas cálidos. Sin embargo, en condiciones estivales severas, dichos materiales pueden sufrir saturación térmica si no se promueve la descarga del calor latente durante la noche. Este trabajo presenta un modelo numérico transitorio y continuamente diferenciable acoplado multicomponente (1D-0D) para evaluar la respuesta térmica de recintos con envolventes compuestas por PCM, incorporando una estrategia de ventilación nocturna natural controlada. Para evitar el ruido numérico y las oscilaciones inherentes a los controles discretos (tipo termostato ON/OFF) en la actualización explícita del aire dentro de un esquema acoplado escalonado, se propone una regularización sigmoideal continua para el flujo de ventilación. La transferencia de calor en la envolvente se resuelve de forma implícita mediante el método de elementos finitos (FEM) bajo una formulación mixta temperatura-entalpía, acoplada a la resolución del balance del aire interior. Los resultados demuestran que la regularización matemática estabiliza el cálculo del recinto y facilita la evaluación precisa del beneficio dual de esta estrategia: proporciona un enfriamiento sensible directo del aire y favorece la extracción del calor latente almacenado en los muros, mitigando en conjunto las desviaciones térmicas interiores respecto del límite superior establecido.

Palabras clave: Envolventes edilicias; Materiales de cambio de fase; Modelo térmico transitorio acoplado; Ventilación nocturna; Regularización; Método de elementos finitos.

Abstract

Computational analysis of building envelopes incorporating phase change materials (PCMs) constitutes a key strategy for passive design and thermal stress mitigation in warm climates. However, under severe summer conditions, such materials can suffer thermal saturation if nocturnal latent heat discharge is not promoted. This work presents a multi-component coupled (1D-0D), transient, continuously differentiable numerical model to evaluate the thermal response of rooms with PCM-integrated envelopes, incorporating a controlled natural night ventilation strategy. To avoid numerical noise and oscillations

inherent to discrete controls (ON/OFF thermostat type) during the explicit update of room air within a staggered coupled scheme, a continuous sigmoidal regularization is proposed for the ventilation flow. Heat transfer within the envelope is solved implicitly using the finite element method (FEM) under a mixed temperature–enthalpy formulation, coupled with the resolution of the indoor air balance. Results demonstrate that mathematical regularization stabilizes the room calculation and facilitates an accurate evaluation of the dual benefit of this strategy: it provides direct sensible cooling of the air and favors the extraction of latent heat stored in the walls, collectively mitigating indoor thermal deviations relative to the established upper limit.

Keywords: Building envelopes; Phase change materials; Coupled transient thermal model; Night ventilation; Regularization; Finite element method.

Introducción

El diseño de envolventes edilicias de alto rendimiento térmico se beneficia significativamente de la incorporación de materiales de cambio de fase (PCM) por su capacidad de almacenar y liberar energía latente (Jha, 2024). Físicamente, los PCM funcionan como capacitancias térmicas no lineales, amortiguando las oscilaciones de temperatura diurnas al absorber el exceso de calor durante la transición sólido-líquido (Regin, 2017). Sin embargo, una limitación en climas de verano cálidos y severos —como el de la región Litoral de Argentina— es la solidificación incompleta durante la noche. Si la temperatura exterior del aire no desciende lo suficiente, el PCM no logra descargar por completo su calor latente almacenado, sufriendo una progresiva saturación térmica que reduce su capacidad de amortiguación para los días consecutivos. Aun asegurando ciclos completos de carga y descarga con una gran frecuencia durante los periodos cálidos, los beneficios de los PCM por sí solos pueden no ser suficientes para lograr una reducción sustancial de la temperatura del aire interior en los edificios (Rashid, 2025).

Para mitigar esta limitación, la ventilación natural nocturna controlada se presenta como una estrategia operativa fundamental de beneficio dual. Por un lado, proporciona un enfriamiento sensible directo del aire interior cuando la inercia del PCM es insuficiente; por otro, el descenso de la temperatura interior incrementa el gradiente térmico convectivo con las superficies de los muros, favoreciendo la descarga nocturna del calor latente acumulado en el PCM (Rashid, 2025). Computacionalmente, la integración de estas dinámicas operativas representa un cuello de botella crítico para el desarrollo de marcos de simulación puramente diferenciables. Las operaciones de ventilación están regidas habitualmente por controles discontinuos (termostatos ON/OFF) que introducen gradientes nulos o infinitos. Estas funciones escalón destruyen la suavidad del modelo matemático, provocando inestabilidades y oscilaciones numéricas que afectan la integración temporal del balance de aire y comprometen la resolución de los sistemas de ecuaciones no lineales mediante esquemas iterativos basados en derivadas, como el método de Newton-Raphson (Dittler, 2025).

Para superar este obstáculo, este trabajo presenta el desarrollo de un sistema primal unificado y continuamente diferenciable (acople 1D–0D). El marco acopla la conducción de calor no lineal transitoria en la envolvente —resuelta mediante una formulación FEM mixta temperatura-entalpía (Álvarez-Hostos, 2023)— con un balance energético de parámetros concentrados para el aire interior. El problema de las discontinuidades operativas se resuelve regularizando la activación de la ventilación mediante funciones de transición sigmoideas. Este enfoque continuo garantiza la estabilidad numérica y la regularidad matemática necesarias para la resolución directa de problemas térmicos transitorios con cambio de fase, preserva la convergencia cuadrática en los esquemas iterativos basados en derivadas y sienta las bases matemáticas indispensables para futuras aplicaciones de optimización continua mediante gradientes analíticos exactos, por ejemplo, a través del método del adjunto (Álvarez-Hostos, 2019).

Desarrollo

La conducción térmica transitoria y no lineal a través de los diversos cerramientos de la envolvente edilicia (muros, techo, piso) se formula utilizando una aproximación unidimensional mediante el método de elementos finitos (FEM) bajo un enfoque mixto temperatura-entalpía. Para cada componente $j \in \{1, \dots, N_c\}$, la ecuación de balance de energía en el dominio espacial $x \in [0, d^{[j]}]$ se expresa como (Álvarez-Hostos, 2023):

$$\rho^{[j]} \frac{\partial \mathcal{H}^{[j]}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k^{[j]} \frac{\partial T^{[j]}}{\partial x} \right) = 0,$$

donde $\rho^{[j]}$, $k^{[j]}$, $T^{[j]}$ y $\mathcal{H}^{[j]}$ representan la densidad, la conductividad térmica efectiva, la temperatura transitoria y la entalpía

específica del componente j , respectivamente. La entalpía específica incorpora de forma continua las contribuciones del calor sensible y del calor latente de cambio de fase:

$$\mathcal{H}^{[j]}(T^{[j]}) = c_p^{[j]}(T^{[j]} - T_{\text{ref}}) + L_f^{[j]} f_1^{[j]}(T^{[j]}),$$

donde $c_p^{[j]}$ es la capacidad calorífica sensible, $L_f^{[j]}$ es el calor latente de fusión por unidad de masa y T_{ref} es una temperatura de referencia. Para preservar la continuidad de clase C^1 requerida por los resolvedores iterativos y los posteriores análisis de sensibilidad, la fracción líquida $f_1^{[j]}$ se regulariza mediante una aproximación sigmoideal suave de la función escalón de Heaviside en torno a la temperatura pico de fusión $T_p^{[j]}$:

$$f_1^{[j]}(T^{[j]}) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \tanh\left(\frac{2\beta}{\tau}(T^{[j]} - T_p^{[j]})\right),$$

donde τ define el intervalo de transición de fase y β es el parámetro de forma que controla la pendiente de suavizado. La discretización temporal del sistema diferencial de conducción no lineal se efectúa mediante un esquema de Euler hacia atrás (totalmente implícito), resolviéndose el sistema de ecuaciones algebraicas resultante en cada paso temporal mediante el algoritmo de Newton-Raphson (NR).

La evolución térmica del recinto se determina mediante un balance energético de parámetros concentrados (0D) para la zona de aire interior (T_z), acoplado mediante condiciones de borde de tipo Robin a las superficies internas de los cerramientos. En un instante temporal discreto $n + 1$, la temperatura del aire T_z^{n+1} se actualiza de forma explícita mediante un esquema de acoplamiento escalonado una vez que el estado térmico de los muros ha alcanzado convergencia en el bucle NR:

$$\rho_z c_{p,z} V_z \frac{T_z^{n+1} - T_z^n}{\Delta t} = \sum_{j=1}^{N_c} h_{\text{int}}^{[j]} A^{[j]} (T_{\text{int}}^{[j],n+1} - T_z^n) + \dot{Q}_{\text{vent}}^{n+1},$$

donde ρ_z , $c_{p,z}$ y V_z denotan la densidad, el calor específico y el volumen del aire del recinto, $A^{[j]}$ es el área del cerramiento j , $h_{\text{int}}^{[j]}$ es el coeficiente de transferencia convectiva interior y $T_{\text{int}}^{[j],n+1}$ es la temperatura de la superficie interna en el nodo $x = 0$.

El flujo de calor intercambiado por la ventilación nocturna $\dot{Q}_{\text{vent}}^{n+1}$ viene dado por:

$$\dot{Q}_{\text{vent}}^n = \dot{m}_v^n c_{p,z} (T_{\text{ext}}^n - T_z^{n-1})$$

Para evitar discontinuidades y saltos de energía que desestabilicen el cálculo del aire, el flujo másico se regulariza como el producto de una capacidad máxima $\dot{m}_{\text{max}}$ calculada a partir de las renovaciones por hora ACH , una ventana temporal programada Γ_t^n (booleana independiente del estado, activa entre las 22:00 h y las 07:00 h), y dos funciones logísticas de activación dependientes de la temperatura:

$$\dot{m}_v^n = \dot{m}_{\text{max}} \cdot \Gamma_t^n \cdot \mathcal{S}_{\text{set}}^n \cdot \mathcal{S}_{\text{therm}}^n$$

donde $\mathcal{S}_{\text{set}}^n$ evalúa la demanda de enfriamiento respecto a la temperatura de setpoint ($T_{\text{set}} = 27^\circ\text{C}$) y $\mathcal{S}_{\text{therm}}^n$ verifica el potencial térmico de enfriamiento ($T_{\text{ext}} < T_z$):

$$\mathcal{S}_{\text{set}}^n = \frac{1}{1 + e^{-\alpha(T_z^{n-1} - T_{\text{set}})}}, \quad \text{y} \quad \mathcal{S}_{\text{therm}}^n = \frac{1}{1 + e^{-\alpha(T_z^{n-1} - T_{\text{ext}}^n)}}$$

El parámetro α controla la suavidad de la transición. Esta formulación actúa como un controlador proporcional continuo que elimina el ruido numérico y preserva la continuidad requerida para la evaluación analítica del gradiente en el sistema adjunto.

Resultados

Para evaluar la estabilidad del modelo y el comportamiento termofísico del recinto, se simula un módulo habitacional de $4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ sometido a condiciones estivales severas en la ciudad de Paraná, Entre Ríos (31.7°S , 60.5°O). Los datos meteorológicos fueron obtenidos de archivos climáticos estándar EPW (EnergyPlus Weather), que es formato estándar

internacional de archivos de datos meteorológicos utilizado en la simulación energética de edificios (BPS, *Building Performance Simulation*). Se analiza la respuesta del aire interior (T_z) considerando un umbral superior de referencia de 27 °C y un *setpoint* de activación para la ventilación de 27 °C ($ACH = 5 \text{ h}^{-1}$, activo entre las 22:00 h y las 07:00 h). La temperatura de cambio de fase se seleccionó en 28 °C.

Con el propósito de aislar la contribución de cada mecanismo físico y evaluar su efecto combinado, se comparan cuatro configuraciones constructivas y operativas:

- **Caso 1 (Referencia):** Envoltente de mortero convencional, sin PCM y sin ventilación nocturna ($ACH = 0$).
- **Caso 2 (Solo Ventilación):** Envoltente de mortero convencional con estrategia de ventilación nocturna controlada ($ACH_{\text{night}} = 5 \text{ h}^{-1}$).
- **Caso 3 (Solo PCM Pasivo):** Envoltente con 24% volumétrico de PCM ($T_p = 28 \text{ °C}$), sin ventilación nocturna ($ACH = 0$).
- **Caso 4 (Combinado: PCM + Ventilación):** Envoltente con 24% volumétrico de PCM acoplada a la ventilación nocturna controlada.

En la Tabla 1 se resumen los indicadores cuantitativos de desempeño térmico obtenidos para un período representativo de olas de calor continuo de 182 días respecto a una temperatura de referencia de 28 °C.

Configuración	PCM (% vol.)	Ventilación (ACH)	<i>Discomfort</i>
Caso 1 (Referencia)	0	0 h^{-1}	3289.73 °C·h
Caso 2 (Solo Vent.)	0	5 h^{-1}	2235.56 °C·h
Caso 3 (Solo PCM)	24	0 h^{-1}	3133.35 °C·h
Caso 4 (Combinado)	24	5 h^{-1}	1920.83 °C·h

Tabla 1. Métricas de desempeño térmico del aire interior para las cuatro configuraciones.

Como se aprecia en la Figura 1, el Caso 1 (Referencia) presenta severas excursiones térmicas por encima del límite de 28 °C durante las horas de máxima irradiación solar. En el Caso 2 (Solo Ventilación), la apertura nocturna de ventanas reduce drásticamente las temperaturas mínimas durante la madrugada, pero la baja capacidad de almacenamiento térmico de la pared de mortero provoca un rápido calentamiento al día siguiente.

Por su parte, el Caso 3 (Solo PCM) logra amortiguar las oscilaciones diurnas y retardar la onda térmica. Sin embargo, en secuencias de días cálidos donde la temperatura exterior nocturna no desciende lo suficiente, la inercia del PCM resulta insuficiente por sí sola y el material sufre una saturación progresiva al no disipar el calor acumulado.

Finalmente, el Caso 4 (Combinado) evidencia el beneficio dual de la estrategia propuesta. La inyección de aire fresco durante la ventana nocturna disipa calor sensible de la zona de aire de forma directa y, simultáneamente, incrementa el gradiente térmico convectivo en la cara interior de los muros, favoreciendo la descarga del calor latente almacenado en el PCM.

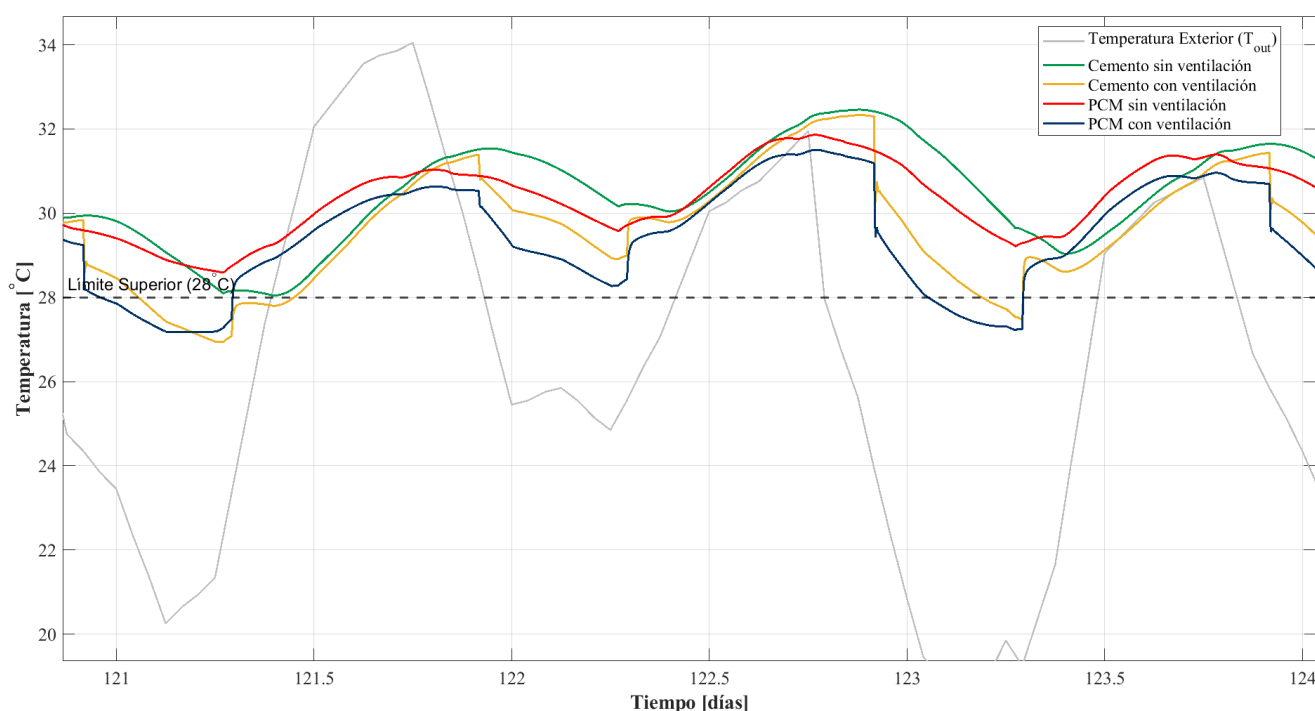


Figura 1. Temperaturas de aire interior para las distintas configuraciones analizadas.

Conclusiones

Se ha desarrollado e implementado un modelo numérico acoplado 1D–0D para la simulación térmica transitoria de recintos con envolventes compuestas por PCM y ventilación nocturna natural controlada. La introducción de funciones logísticas continuas para la activación de la ventilación demostró ser una estrategia matemática altamente efectiva para erradicar el ruido numérico y asegurar la estabilidad en esquemas de integración temporal con pasos amplios. Desde la perspectiva termofísica, los resultados evidenciaron el beneficio combinado de la estrategia: la ventilación controlada no solo proporciona un enfriamiento sensible directo del ambiente interior, sino que incrementa el gradiente térmico convectivo con las superficies de los muros, favoreciendo la descarga nocturna del calor latente almacenado y mitigando la saturación progresiva del PCM. Asimismo, la formulación continua desarrollada en este sistema primal sienta las bases matemáticas indispensables para, en futuras etapas de la investigación, acoplar la evaluación de sensibilidades analíticas exactas mediante el método del adjunto y abordar la optimización sistemática simultánea de materiales y estrategias operativas.

Utilización de IA generativa / herramientas IA

Declaro la utilización de la herramienta IA Gemini para su uso en la revisión del manuscrito con la finalidad de adecuar la redacción técnica y traducir contenidos. Confirmando que luego de la utilización, los contenidos obtenidos fueron revisados, constatados y editados, asumiendo plena responsabilidad por el contenido presentado en el presente trabajo.

Referencias

- Álvarez-Hostos, J. C., Fachinotti, V. D., Peralta, I., & Tourn, B. A. (2019). Computational design of metadevices for heat flux manipulation considering the transient regime. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 76(8), 648–663. <https://doi.org/10.1080/10407782.2019.1654308>
- Álvarez-Hostos, J. C., Tourn, B. A., Zambrano-Carrillo, J. A., Sarache-Piña, A. J., & Fachinotti, V. D. (2023). Solving heat conduction problems in the start-up stage of direct chill casting processes via a temperature-enthalpy mixed formulation based on the improved element-free Galerkin method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 212, Article 124231. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124231>
- Dittler, R. A., Demarchi, M. C., Álvarez-Hostos, J. C., Albanesi, A. E., & Tourn, B. A. (2025). A regularized approach for derivative-based numerical solution of non-linearities in phase change static hysteresis modeling. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 163, Article 108691. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108691>
- Jha, S. K., Sankar, A., Zhou, Y., & Ghosh, A. (2024). Incorporation of Phase Change Materials in buildings. *Construction Materials*, 4(4), 676–703. <https://doi.org/10.3390/constrmater4040037>
- Rashid, F. L., Al-Obaidi, M. A., Hatem, W. A., Al Maimuri, N. M. L., Ameen, A., Ahmad, S., Agyekum, E. B., Kadhim, S. A., & Hammoodi, K. A. (2025). Optimising Phase Change Materials for ventilated building components in sustainable building design: A comprehensive review. *Energy and Buildings*, 343, Article 115947. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115947>
- Regin, F. S., Solanki, S. C., & Saini, J. S. (2008). Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2438–2458. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.06.009>