



Determinación in situ de la resistencia térmica de envolventes edilicias livianas bajo condiciones de funcionamiento libre

In situ determination of the thermal resistance of light walls in free-running buildings

Marcos Hongn

Filiación: INENCO – (UNSa – CONICET)

Dirección: Avda. Bolivia 5150, A4400FVY Salta, Argentina. Tel. 0387-4255424 – Fax: 0387-4255389

Correo: mhongn@unsa.edu.ar

Silvana Flores Larsen

INENCO – (UNSa – CONICET)

Correo: seflores@unsa.edu.ar

Silvina González

INENCO – (UNSa – CONICET)

Correo: ing.silvina.gonzalez@gmail.com

Nicolás Castro

INENCO – (UNSa – CONICET)

Correo: nicolascastro7@gmail.com

Darío Jaime

Universidad Nacional de Salta

Correo: jj.me.dario@gmail.com

Código del manuscrito: 10_005

Fecha de aceptación: 04/10/2019

Resumen

En los últimos años, el consumo de energía de los edificios se ha convertido en un importante problema mundial. Para evaluar el desempeño energético de los mismos, se requiere una estimación in situ confiable de la resistencia térmica de las paredes (valor R). Existen métodos dinámicos y estacionarios probados satisfactoriamente en la determinación de R cuando los edificios se encuentran acondicionados (calefaccionados y/o refrigerados). Sin embargo, es escasa la información sobre los métodos aplicados a edificios de funcionamiento libre, en cuanto a los períodos de medición requeridos, la convergencia de los resultados, etc., especialmente en climas templados y cálidos donde ambos, flujo de calor no invertido y grandes gradientes térmicos, no ocurren naturalmente. En el presente trabajo se evaluó la capacidad de un método semi-estacionario: ISO 9869, y uno dinámico: Pentaur, para estimar el valor R de una envolvente liviana con características constructivas típicas de la ciudad de Salta y bajo condiciones de medición desfavorables y aleatorias. Se utilizaron conjuntos de datos simulados y experimentales de las temperaturas de la superficie interna y externa de la pared y el flujo de calor para analizar el efecto de las condiciones de medición en los resultados obtenidos. Los resultados mostraron que el método Pentaur permite determinar los valores de la resistencia térmica con precisión, para las series de datos experimentales en las distintas estaciones del año. En base a lo observado, se indican pautas para la utilización de este método dinámico con medidas in situ como datos de entrada, para condiciones de funcionamiento libre.



Palabras claves: resistencia térmica, método Promedio, método Pentaur, funcionamiento libre.

Abstract

In recent years, buildings energy consumption has become a major global issue. In order to assess the actual energy performance of buildings, a reliable in-situ estimation of the thermal resistance of walls (R -value) is required. In conditioned buildings there are many well-known quasi-steady and dynamic methods to determine R -value. Nevertheless, in free-running buildings there is no much information about the usefulness of the different available methods, the required measuring periods, convergence, etc., especially in mild and warm climates where both, stable non-inverting heat flux and high thermal gradients, do not naturally occur. A quasi-steady method as ISO 9869, and a dynamic method as Pentaur (Anderlind) was analyzed in this work with the aim of to evaluate the thermal resistance in a light building envelope and for adverse and random measurement conditions. Both simulated and experimental data sets of surface temperatures and heat fluxes were used to analyze the effect of the measuring conditions (surface temperature difference and direction of the heat flow) on the convergence and final R -values. The results indicated that the Pentaur method allows determining the R -values with accuracy, for the different year stations. This research provides guidelines to employ the Pentaur method and the required survey duration for in-situ estimation of the thermal resistance in free-running buildings.

Keywords: thermal resistance, Average method, Pentaur method, free-running building.

Introducción

A nivel mundial, el consumo energético de los edificios representa más del 30% de la demanda de energía final, el 55% de la demanda eléctrica final y el 26% de las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía (IEA, 2017). El porcentaje de calefacción y refrigeración en dicho sector varía entre el 18% y el 73% en todo el mundo, entre el 35% y el 70% en Europa y del 35% al 40% en América Latina (Ürge-Vorsatz et al., 2015; Atsonios et al., 2017), dependiendo del clima, características del edificio, y uso. La principal estrategia para reducir el consumo destinado a la calefacción / refrigeración de espacios es la mejora de la eficiencia de la envolvente del edificio, en parte cuantificada por la resistencia térmica (R). Mientras que en la mayoría de los países en desarrollo, no hay restricciones para los valores R de paredes y techos (porque los códigos de construcción no son obligatorios o inexistentes), en los países desarrollados los valores R están limitados por las regulaciones de construcción en edificios nuevos y antiguos renovados. Además, es necesario conocer la resistencia térmica para una variedad de aplicaciones tales como cumplimiento de normas de construcción, etiquetado energético, evaluación térmica post-renovación de envolventes edilicias y como entrada de datos para el modelado del desempeño energético de los edificios. Principalmente, la información de R proviene de las hojas de datos de los materiales, proporcionadas por los fabricantes, y los estándares de la literatura. Pero, en la práctica, los valores reales pueden ser muy diferentes de los teóricos, principalmente debido a características de construcción desconocidas (como el porcentaje de contenido de mortero), la calidad de la mano de obra, la presencia de huecos y grietas, el contenido de humedad, la degradación del material debido al envejecimiento y la exposición al aire libre, la falta de homogeneidad de las paredes, etc. (Lucchi, 2017; Rotilio et al., 2018). Por lo tanto, la medición in situ de valores reales de R resulta de mayor interés y desde los años 80 ha sido objeto de estudio de muchos trabajos de investigación.

Existen dos enfoques principales para la estimación in situ de R : métodos cuasi-estacionarios (o métodos Promedio y Promedio Modificado) y dinámicos (red R -C, Pentaur, ARX, Estocásticos, etc.). Ambos enfoques requieren la medición de las temperaturas de las superficies interna y externa y el flujo de calor a través de la pared, durante períodos de varios días. El flujo de calor a través de la pared generalmente se mide del lado interno donde el flujo de calor es más estable que en el lado exterior. En condiciones cuasi-estacionarias, los métodos estandarizados ISO 9869 son los más utilizados porque producen resultados confiables en condiciones de medición óptimas (es decir, sin inversiones de flujo de calor y diferencias de temperaturas promedio superiores a 10 °C) y son simples de implementar, sobre todo por usuarios no experimentados. Sin embargo, con frecuencia, la naturaleza intrínsecamente variable de las condiciones meteorológicas hace que no se alcance el estado cuasi-estacionario y éstos métodos no responden adecuadamente (Roulet et al., 1985).

Comparativamente, incluso para grandes gradientes térmicos y largos periodos de monitoreo, las mediciones del valor R de la misma pared utilizando diferentes métodos no siempre estuvieron de acuerdo, como se muestra en la literatura (Atsonios et al., 2017). Deconinck y Roels (2016) compararon los métodos cuasi-estacionarios (Promedio y Promedio Modificado) y los dinámicos (Pentaur, ARX y Estocásticos) para una pared aislada, en cuatro estaciones. Encontraron que los métodos dinámicos tienen un mejor rendimiento en comparación con los otros mencionados y pueden generar estimaciones confiables de resistencia térmica a partir de las mediciones típicas de verano, contrariamente a los métodos semi-estacionarios. Gaspar et al. (2016) compararon los métodos ISO promedio y dinámico y concluyeron que ambos funcionan igual de bien cuando las condiciones de medición son óptimas. En el caso de una diferencia de temperatura baja, solo el método dinámico conduce a resultados confiables. Roulet et al. (1985) comparó métodos promedios y dinámicos y concluyó que los resultados eran estables cuando la temperatura interior era constante antes y durante el período de medición. Desogus et al. (2011) investigaron los resultados del método Promedio para dos condiciones de medición diferentes, y concluyeron que cuanto menor era la diferencia de temperaturas, los resultados eran menos precisos. Evangelisti et al. (2018) sugirió que la probabilidad de obtener grandes errores aumenta cuando las temperaturas del aire interior presentan grandes variaciones en comparación con la diferencia de temperatura entre ambos lados de la pared o cuando la pared recibe el impacto de la radiación solar u otras influencias térmicas.

Las condiciones de medición mencionadas anteriormente, donde las variables monitoreadas dependen solamente de las características de la envolvente del edificio y de las condiciones climáticas externas, sin accionamiento de sistemas de calefacción y/o refrigeración, se denominan de funcionamiento libre. Estas condiciones son las más aleatorias en la medición in situ de R . En los edificios de funcionamiento libre, especialmente en aquellos edificios en climas templados y cálidos donde es difícil alcanzar altos gradientes térmicos (Bienvenido-Huertas et al., 2019), es escasa la información sobre el desempeño de métodos cuasi-estacionarios y dinámicos y los períodos de medición requeridos para alcanzar la convergencia. En este contexto, el objetivo principal de este documento es evaluar la capacidad de dos métodos in situ diferentes (Promedio, estacionario, y Pentaur, dinámico) para estimar el valor R de un edificio de funcionamiento libre en un clima templado, bajo condiciones de flujo de calor alterno, para diferentes estaciones. Se dedicará especial atención al método dinámico Pentaur, debido a su mayor potencial y condiciones más generales de aplicación.

Metodología

Primeramente, en la sección siguiente se describe la formulación de los métodos a implementar: Método Promedio (ISO 9869) y Método Pentaur (Anderlind, 1996). Las variables de entrada requeridas, las temperaturas en las caras interna y externa y el flujo de calor a través de la pared, se obtuvieron de una casilla experimental de prueba en condiciones de funcionamiento libre (sin sistemas de calefacción ni de refrigeración), bajo condiciones climáticas moderadas. Si bien se utilizaron datos experimentales y datos simulados, se hace énfasis sobre los primeros, y los últimos serán usados como datos complementarios. En todas las tandas experimentales se observaron flujos de calor alternantes y bajos gradientes de temperatura.

Métodos para la determinación de R

Método Promedio (ISO 9869)

El método Promedio, según lo establecido en la norma ISO 9869, se ha convertido en el método más extendido y aceptado para la caracterización térmica in situ de los elementos de construcción (Rasooli e Itard, 2018). Es un método de estado estacionario basado en el hecho de que el promedio de las temperaturas y los flujos de calor en largos periodos de tiempo de medición anula los efectos transitorios. Para un conjunto de n mediciones, R se calcula como:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (T_{in,j} - T_{ex,j})}{\sum_{j=1}^n q_j} \quad (1)$$

Donde, $T_{in,j}$, $T_{ex,j}$, q_j son la j -ésima medida de la temperatura de la superficie interior, la temperatura de la superficie exterior y el flujo de calor a través del elemento de pared, respectivamente. Este método funciona bien si la temperatura exterior siempre es más baja (o más alta) que la temperatura interior y si el período de medición es lo suficientemente largo. Generalmente se recomienda una diferencia > 10 °C entre la temperatura interior y exterior (Bienvenido-Huertas et al., 2019).

La norma establece que, para los elementos de construcción de alta capacidad calorífica, el análisis debería realizarse en intervalos de tiempo múltiplos enteros de 24 horas, con al menos 72 horas para materiales de construcción ligeros y 96 horas para elementos con grandes capacidades de calor. El cambio en el calor acumulado en la pared no debe ser más del 5% del calor que pasa a través de la pared durante el período de medición. Generalmente, el test termina cuando el valor R no se desvíe por más de $\pm 5\%$ del valor obtenido 24 horas antes. Además, el valor R obtenido en los primeros 2/3 del tiempo de medición no debe desviarse más del 5% del valor obtenido en los últimos 2/3 del tiempo de medición. Cuando estos criterios no se cumplen, entonces las mediciones deben extenderse en el tiempo o reiniciarse.

Método Pentaur de Anderlind

El modelo Pentaur se clasifica como un modelo estadístico ARX desarrollado por Anderlind (1996), aunque el propio Anderlind establece que se trata de un modelo con base física y estadística. Este método establece que la variación en el flujo de calor a través de una componente constructiva del edificio puede ser modelada mediante cuatro partes diferentes: una primera parte incluye el comportamiento estacionario en el flujo de calor, mientras que los términos restantes describen las fluctuaciones momentáneas del flujo de calor como respuesta a los cambios de temperatura en ambas caras de la pared y la diferencia en el flujo de calor, todo para tiempos pasados. Así, el flujo de calor estimado se escribe:

$$q_p = \frac{(T_{in,p} - T_{ex,p})}{R} + \sum_{n=1}^k dT_{in,n}A_n + \sum_{n=1}^k dT_{ex,n}B_n + \sum_{n=1}^k dq_nC_n \quad (2)$$

donde k es el número de pasos de tiempo (pasado) considerados significativos (el "tiempo de influencia", un valor entre 8 y 30), q_p es la densidad del flujo de calor estimada en el tiempo t_p ($p > k$), $T_{in,p}$ y $T_{ex,p}$ son las temperaturas de la superficie interior y exterior en el tiempo t_p , respectivamente, $dT_{in,n}$, $dT_{ex,n}$ y dq_n son la diferencia de temperatura interior, exterior y flujo de calor, respectivamente, entre los dos tiempos consecutivos t_{n-1} y t_n . Los parámetros a determinar son R^{-1} , A_n , B_n , C_n ($1+3k$ parámetros). La técnica de regresión lineal con múltiples variables, explicada claramente en Coelho-Barros et al., (2008), es implementada para resolver el conjunto anterior de ecuaciones y encontrar los coeficientes desconocidos, incluida la resistencia térmica R . En este trabajo se consideró que la convergencia es alcanzada una vez que: se midieron al menos 72 horas, el valor de R en el tiempo t_p difiere en menos de $\pm 5\%$ del valor 24 horas antes, y, además, el coeficiente de variación (conocido también como la desviación estándar relativa) en un periodo de tres días consecutivos debe ser menor al 5% (acorde a lo establecido en norma ISO), Atsonios et al., (2017).

El desempeño de este modelo dinámico será analizado mediante los siguientes parámetros estadísticos, ampliamente conocidos: RMSD (desviación cuadrática media), Corr (coeficiente de correlación), STDr (razón del desvío estándar, desvío estándar de las predicciones dividido el desvío estándar de las medidas) y BIAS (sesgo). Parámetros propios del modelo, como el tiempo de influencia " k " y los saltos en los datos en este periodo " Δk ", son seteados de manera de minimizar los errores, especialmente RMSD. Éstos parámetros se seleccionan en función del tipo de pared (para paredes poco masivas el tiempo de influencia no excede 24 horas) y las condiciones del clima.

Consideraciones experimentales y simuladas

Prototipo experimental

El local experimental medido se ubica en la ciudad de Salta, en el predio experimental del INENCO (24.85° S, 65.48° O, 1180 msnm). La climatología del lugar indica que los inviernos son secos donde los altos niveles de irradiación solar causan grandes amplitudes de temperatura, tanto en invierno como en verano, por lo que el flujo de calor de la pared puede presentar valores negativos y positivos en el mismo día (flujo alterno).

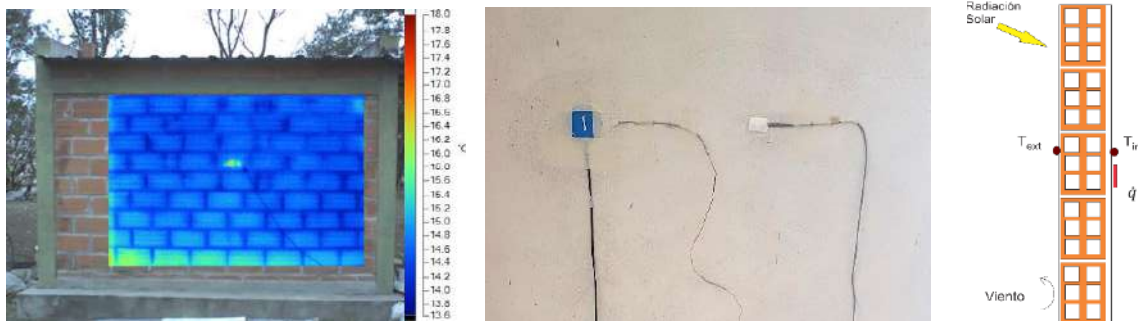


Fig.1: Imagen térmica de la pared norte con el sensor de temperatura externo (izquierda), vista de las termocuplas y el sensor de flujo de calor instalados en la superficie interior de la pared (centro) y representación esquemática del montaje de los sensores sobre la pared a ensayar (derecha).

La casilla experimental tiene una superficie de 3 m x 2.5 m y una altura de 2.3 m (fig. 1), orientada 16° al este desde el norte real. El material de las paredes es de ladrillo cerámico hueco (0.12 m de espesor, conductividad térmica: 0.44 W / m-K, densidad: 790 kg / m³, calor específico: 850 J·kg / K) con revoque en el lado interno (0,015 m de espesor) y sin aislación térmica. El valor teórico de R para esta pared, según las propiedades definidas para el ladrillo hueco y el revoque interior, es 0.29 m²-K / W. El techo es de chapa de acero galvanizado, seguido de una cámara de aire (0.15 m de espesor) y un cielo raso de poliestireno expandido de 0.05 m de espesor. El piso se compone por una capa de concreto (0.15 m de espesor, conductividad térmica: 1.2 W / m-K, densidad: 1750 kg / m³, calor específico: 840 J·kg / K) con aislación térmica (poliestireno expandido de 0.04 m de espesor). La casilla tiene una ventana con marco de madera con un vidrio simple (0.003 m de espesor, 1 m de longitud y 1 m de altura) y una puerta de madera (0.84 m x 2 m x 0.05 m). En el local no se utilizan sistemas de refrigeración ni de calefacción.

Equipamiento y medición

El posicionamiento de los sensores se representó esquemáticamente en la fig.1 (derecha). Las temperaturas interiores y exteriores de la superficie se midieron en la pared norte, junto con el flujo de calor interior, la temperatura del aire interior y las condiciones ambientales exteriores (temperatura ambiente, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, irradiancia solar sobre superficie horizontal, éstas registradas por una estación meteorológica Davis Vantage Pro II, ubicada en el mismo predio experimental) en intervalos de tiempo de 15 minutos.

Las temperaturas de la superficie interior y exterior en la pared norte se midieron, también, cada 15 minutos con termocuplas tipo K conectados a los dataloggers HOBO U12-014 (12 bits, resolución 0.32 °C, exactitud de 0.40 °C a 30 °C). Los termopares se instalaron sobre la superficie en el centro geométrico de un ladrillo en la zona central de la pared. Los sensores en la superficie exterior estaban protegidos de la lluvia y la radiación solar directa. El flujo de calor a través de la pared se midió con un sensor termoeléctrico de placa Hukseflux HP01 instalado en el lado interno de la pared y cerca del termopar interno. La resistencia térmica de los sensores de flujo de calor es inferior a 6.25x10⁻³ m²K W⁻¹ y puede considerarse despreciable en relación con la resistencia térmica total de la pared testeada. La sensibilidad del sensor es de 61.26 μV W⁻¹m² y está conectada a un sistema de adquisición de datos NOVUS LOGBOX-AA IP65.

Las medidas se realizaron en un lapso total de 162 días (con escasas precipitaciones), con una frecuencia de registro de 15 minutos y para las cuatro estaciones: verano (36 días, desde el 2 de enero al 6 de febrero de 2017), otoño (57 días, desde el 12 de abril al 8 de junio de 2017), invierno (46 días, del 30 de junio al 15 de agosto de 2017) y pre-primavera (23 días, desde el 31 de agosto al 22 de septiembre de 2017). Por razones de extensión, este último periodo no será analizado de manera detallada, sin embargo, será incluido en el resumen de resultados al final del trabajo.

Datos simulados mediante EnergyPlus

Para complementar el estudio experimental, se simuló el desempeño térmico de la casilla experimental, descrita en el apartado anterior, mediante EnergyPlus (EP). EP es una herramienta de código abierto, desarrollada por el Departamento de Energía de los Estados Unidos, usada ampliamente en la simulación de edificios (EnergyPlus, 2018). En EP, la geometría y los datos básicos de construcción se definen a través de una interfaz visual desarrollada con un complemento gratuito para el software SketchUp, una herramienta de modelado 3D desarrollada por Trimble (SketchUp, 2018). En la fig.2 puede observarse la casilla modelada en SketchUp, está fue exportada hacia EP para proceder con la simulación.

La simulación térmica se realizó considerando dos zonas térmicas (zona interior y cámara de aire, entre el techo y el cielo raso) sin ganancias de calor internas y renovaciones constantes de aire. Todos los elementos de sombreado en el entorno, como los voladizos, se introdujeron como "dispositivos de sombreado" en EP y se consideraron completamente opacos. Se asumieron las siguientes condiciones:

- Transferencia de calor unidimensional en paredes.
- La transferencia de masa (humedad) no se considera en los cálculos.
- Las paredes están expuestas a la radiación solar. Se utilizó un albedo de 0.37 y una absorción solar de paredes de 0.5.
- Las superficies exteriores, techo y paredes, están expuestas al viento y a la radiación solar. Coeficientes de transferencia de calor por convección: se seleccionan mediante el algoritmo de convección adaptativo. De forma predeterminada, en superficies exteriores se utiliza el modelo de convección DOE-2 y TARP para interiores (EnergyPlus Manual, 2018).
- Para considerar la transferencia de calor conductiva con el suelo, el elemento "piso" posee una capa extra, definido como tierra (1 m de espesor, como se indicó anteriormente) conectado a un nodo de temperatura constante (19 °C).
- No se consideran cargas térmicas en el interior del local (funcionamiento libre).
- Algoritmo basado en la Función de Transferencia (conducción), para el balance de calor en superficies.

Los datos meteorológicos medidos se utilizaron para crear un archivo EPW definido por el usuario, que incluye la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad y la dirección del viento y los valores de presión atmosférica. Debido a que solo se obtuvieron mediciones de la irradiancia global a partir de las mediciones, la irradiancia directa normal y la irradiancia difusa se obtuvieron con el modelo Engerer2 (Engerer, 2015).

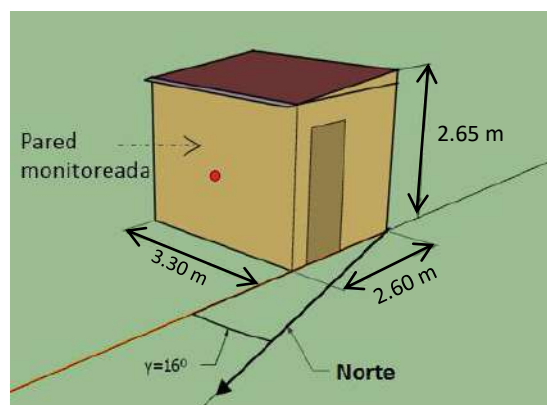


Fig 2: Representación de la casilla experimental y sus dimensiones exteriores, en SketchUp.

Los resultados de la simulación tienen un salto temporal de una hora. De EP se obtuvo el flujo de calor por conducción sobre la cara interna de la pared, además de las temperaturas interior del local y superficiales de la pared. Estas salidas (obtenidas mediante datos meteorológicos medidos) fueron ajustadas mediante los datos experimentales de temperaturas y flujo de calor.

Se empleó el coeficiente de determinación (R^2) para determinar la representatividad de la simulación. Para todas las series de datos, los valores de R^2 fueron superiores a 0.96 para todos los datos de temperatura (superficiales interna y externa y aire interior) y superiores a 0.90 en la comparación del flujo de calor medido y simulado. Esto implica que los parámetros de la simulación están ajustados y pueden representar la situación real con un aceptable grado de fidelidad.

Resultados

Tabla 1. Condiciones de medida durante la etapa experimental.

	Orientación Pared	Duración (días)	$\overline{\Delta T}$ ($^{\circ}\text{C}$) = $\overline{T_{in}} - \overline{T_{ex}}$	\bar{q} (W/m ²)	Dirección q
Verano	Norte	36	-0.34	-1.39	Alternante
Otoño	Norte	57	+1.06	+0.97	Alternante
Invierno	Norte	46	-0.67	-5.53	Alternante
Primavera	Norte	23	+0.81	+0.74	Alternante

Las condiciones de las series de medidas se resumieron en la tabla 1, donde se indicó la diferencia de temperaturas media ($\overline{T_{in}} - \overline{T_{ex}}$), la tasa de flujo de calor medio \bar{q} y la dirección del flujo durante los días de medición. Se dividen dos periodos en la serie de datos experimentales, el de *calibración* se extiende desde el inicio de los datos considerados para ejecutar el modelo hasta el momento donde se alcanza la convergencia. El periodo de *validación* se extiende desde el día de convergencia hasta el final (generalmente) de los datos incluidos en el estudio. Estos periodos son independientes en cada serie de datos y sólo el método dinámico presenta un análisis derivado de esta consideración (cuantificado con los parámetros estadísticos), teniendo en cuenta el flujo de calor medido y simulado.

Verano

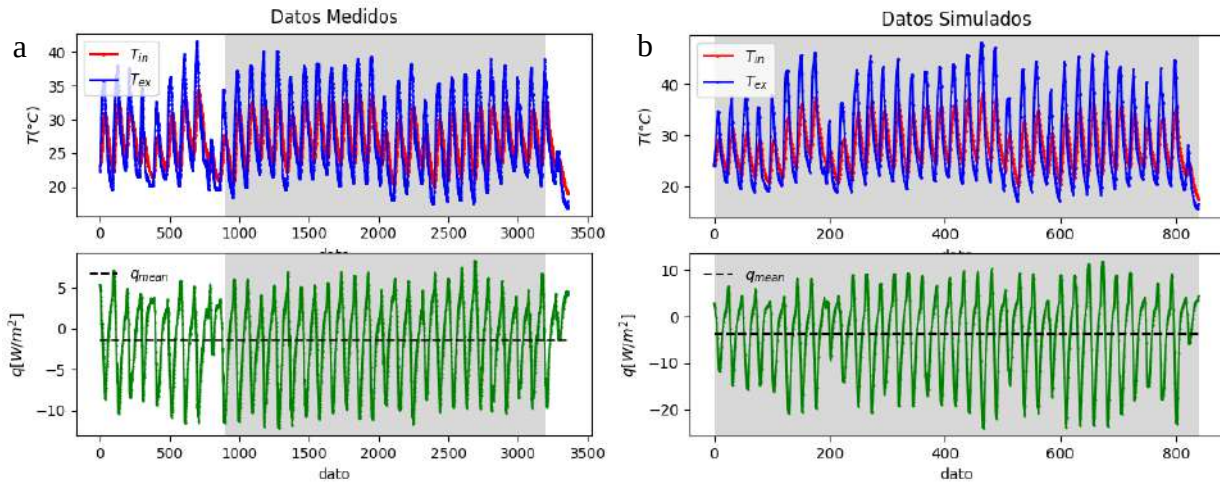
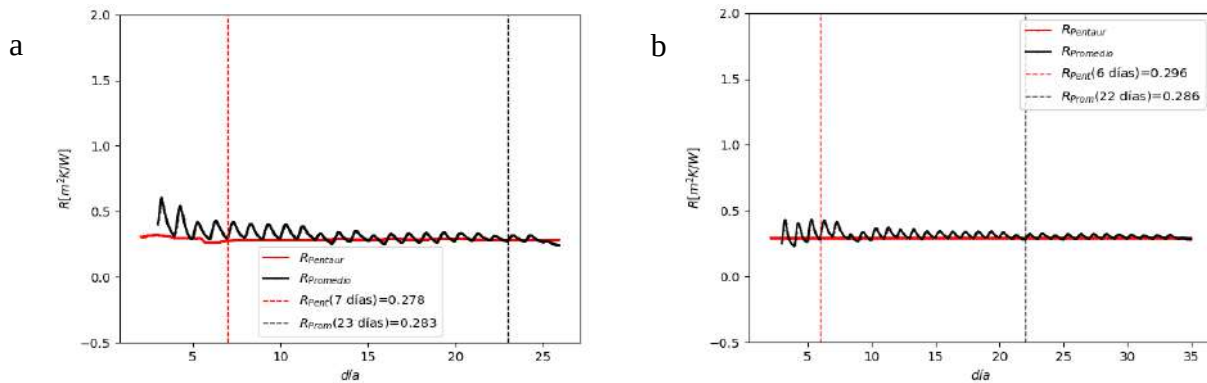


Fig. 3: Datos de alimentación a los modelos, para verano: a) experimentales y b) simulados. En el análisis experimental, se seleccionó el periodo con mayor uniformidad para aplicar los métodos (sombreado en gris).

La fig. 3 muestra los valores de T_{in} , T_{ex} y q medidos (3a) y simulados (3b). Estas figuras tienen un alto grado de concordancia, por el ajuste en los parámetros de simulación como se explicó en el apartado anterior. Del total de datos registrados, se utilizó el 68% (como se indica con sombreado gris en fig. 3a). No se consideró, en la implementación de los modelos con datos experimentales, el periodo con condiciones meteorológicas muy variables ya que esto afecta la estabilidad de las medidas y, por consecuencia, los resultados de R . Por otro lado, al trabajar con datos simulados (fig. 3b) se puede considerar todo el periodo, ya que se eliminan las fluctuaciones propias de los sensores y la estabilidad puede lograrse, aunque las condiciones ambientales varíen abruptamente.



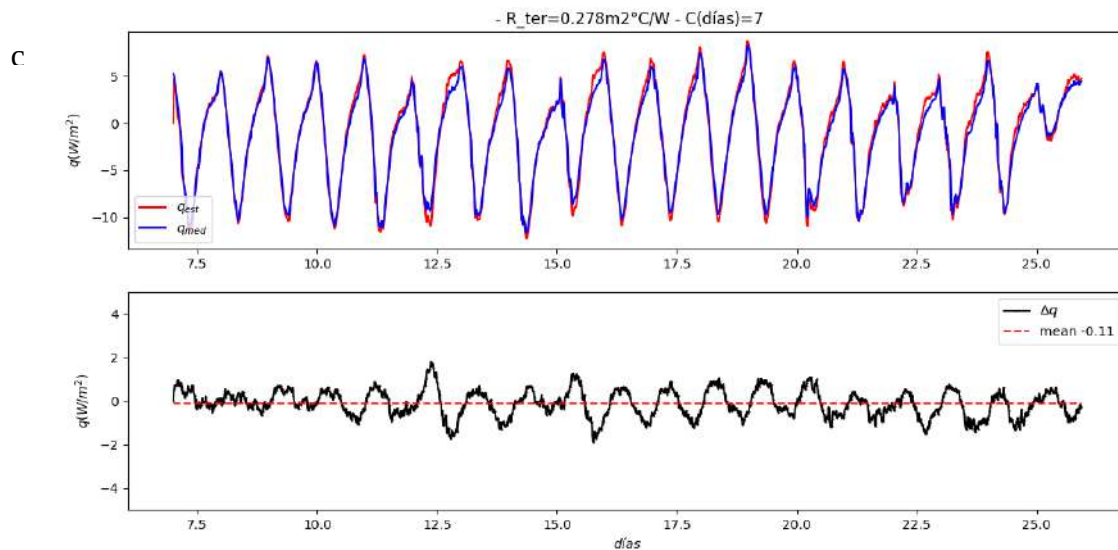


Fig. 4: Verano, evolución del valor de R en el tiempo: a) datos experimentales y b) datos simulados, el valor y los días de convergencia se indican en la leyenda. En c) arriba: contraste entre q_{med} (azul) y q_{est} (rojo), abajo: diferencia entre ambos términos y valor medio de la diferencia, sólo para Pentaur.

La resistencia térmica R estimadas mediante los modelos Pentaur y Promedio se observan en la fig. 4a (datos in situ) y 4b (datos simulados). Haciendo énfasis en los datos experimentales, fig. 4a, R converge en 7 días a un valor de $0.278 \text{ m}^2\text{-K/W}$ mediante Pentaur, y en 23 días a $0.283 \text{ m}^2\text{-K/W}$ con el método Promedio. En la fig. 4b, los resultados presentan una variación más suave (como era de esperarse), aunque la convergencia es alcanzada en periodos de tiempo similares al caso experimental, debido a que los datos de entrada a los modelos, en este caso, tienen una frecuencia de 60 minutos. Los datos experimentales tienen una frecuencia de 15 minutos, lo que acelera la convergencia de los métodos a costa de un mayor consumo computacional (mayor tiempo de cálculo).

En la fig. 4c se muestra el desempeño del modelo dinámico Pentaur, mediante el contraste de valores de q_{est} y q_{med} (4c-arriba) en el periodo de datos considerado para la validación de los resultados. La figura (abajo) muestra también la diferencia $\Delta q = q_{est} - q_{med}$. Una vez determinada la convergencia, el vector de parámetros en ese instante de tiempo, determinado por la resolución de la regresión lineal multi-variable (donde todos los datos en el periodo $t < t_{convergencia}$ tienen influencia en el cálculo del mismo), es almacenado y se implementa mediante la ec. (2) para obtener el valor estimado q_{est} en la etapa de validación. Es decir que, en el periodo de validación, el vector de parámetros no se sigue recalculando. Cabe recordar, que el primer parámetro de dicho vector, es el término $1/R$, donde R es la resistencia térmica para el tiempo $t_{convergencia}$. La información acorde a los parámetros estadísticos de ajuste se encuentra tabulada más adelante, en la tabla 2.

Otoño

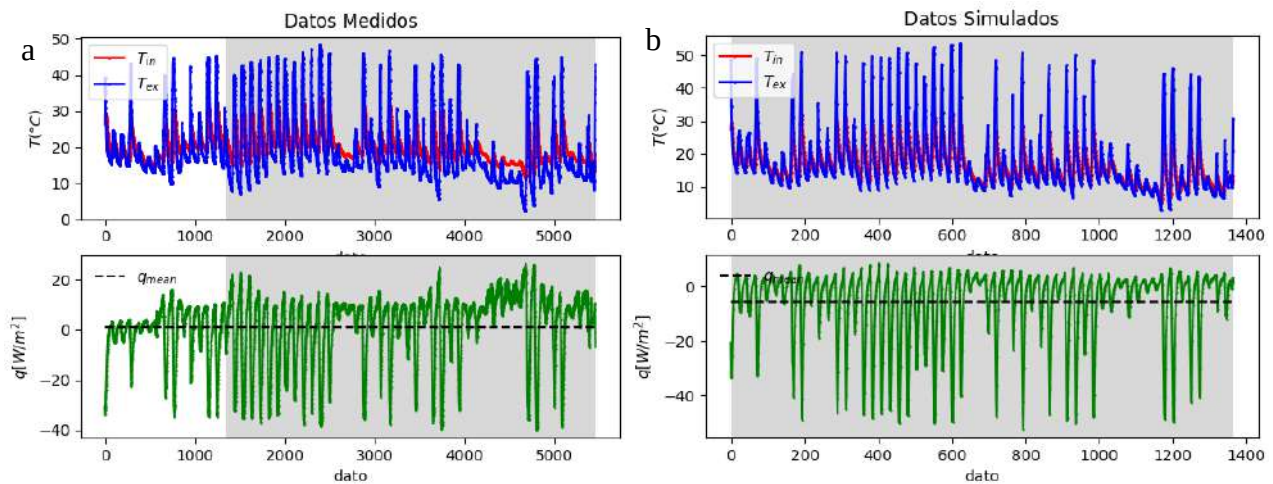


Fig. 5: Datos de alimentación a los modelos, para otoño: a) experimentales y b) simulados. El sombreado gris implica el periodo de datos utilizado en los modelos.

Los datos ingresados en los modelos fueron correspondieron al periodo indicado en fig. 5a, para el caso experimental. Puede observarse, de fig. 6a, que el método Promedio estacionario no muestra convergencia. Los resultados obtenidos mediante Pentaur indican convergencia al día 16 a un valor de $0.298 \text{ m}^2\text{-K/W}$. El método presentó grandes variaciones los primeros días (hasta el día 5). Variaciones en los datos meteorológicos dan lugar a que el método requiera mayor cantidad de días para converger. Para los datos simulados, el método promedio presenta convergencia en 14 días. Con el método dinámico, el valor de R se obtiene rápidamente y con gran exactitud (sin variaciones en todo el periodo de datos simulados).

La estimación del flujo de calor en el periodo de validación (datos experimentales) representa adecuadamente el patrón de variación “real”, debido al coeficiente de correlación (Corr) de 1, aunque sobreestima los valores máximos y mínimos. Esto da lugar a que los valores estimados presenten un BIAS (sesgo) corresponde a 2.50 W/m^2 . Esto es observado claramente a través de la fig. 6c (abajo), donde la diferencia entre el flujo de calor medido y estimado es siempre negativa.

Esto se debe a la falta de uniformidad en los datos de entrada, con periodos intercalados con flujos de calor con gran amplitud (datos 1300 al 2500 y 3000 a 4000, fig. 5a) y con pequeña amplitud (datos del 2500 al 2800 y del 4000 al 4700, por ejemplo). Esto corresponde a periodos soleados calurosos, seguidos de días nublados frescos y/o con elevada humedad en el ambiente.

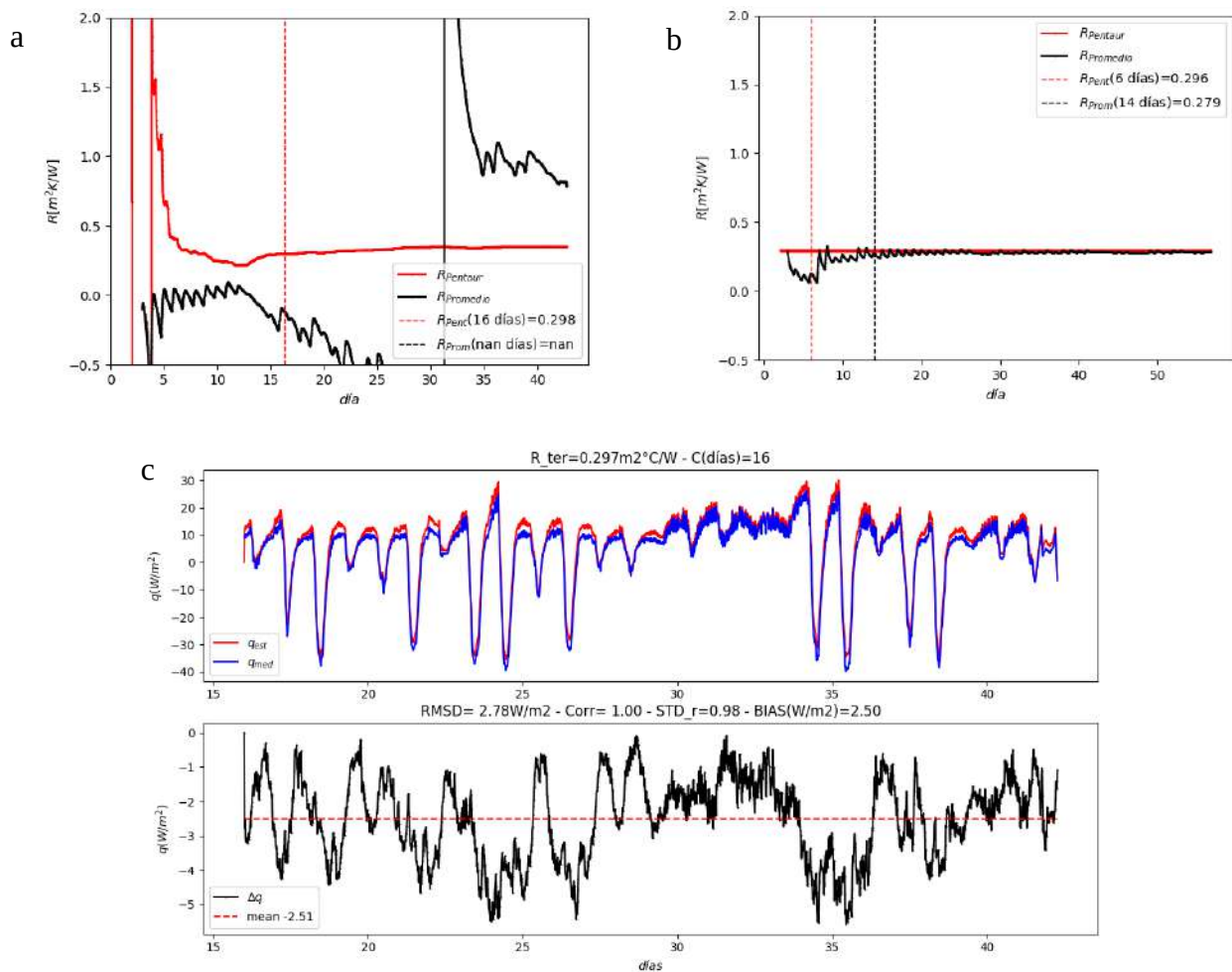


Fig. 6: Otoño, evolución del valor de R en el tiempo: a) datos experimentales y b) datos simulados, el valor y los días de convergencia se indican en la leyenda. En c) arriba: contraste entre q_{med} (azul) y q_{est} (rojo), abajo: diferencia entre ambos términos y valor medio de la diferencia, sólo para Pentaur.

Invierno

Por la orientación de la pared (16° desde Norte hacia el Este), este es el periodo donde la cara externa de la misma recibe grandes cantidades de irradiancia directa, en los días soleados. Como se mencionó con anterioridad, esta situación afecta negativamente el funcionamiento de los métodos.

En este caso se seleccionaron todos los datos del periodo para la determinación de R . Como se aprecia en la fig. 8a, a pesar de que el flujo de calor medio en la serie de datos presenta el valor más lejano de 0 ($-5.53 W/m^2$), el valor de la resistencia térmica converge, con Pentaur, a un valor alejado de lo esperado (41% menor), en 8 días. El método Promedio converge a un valor de $0.122 m^2 \cdot K/W$, en 25 días. Para los datos simulados se observa convergencia, al valor esperado, para ambos métodos, según fig. 8b.

En la fig. 8c, puede observarse una correspondencia aceptable en la predicción del comportamiento del flujo de calor, aunque con leves sobrestimaciones en los máximos y subestimaciones en los mínimos (en los periodos con grandes amplitudes de flujo q). A pesar de que los datos medidos no presentan tanta variabilidad como en otras series anteriores, el valor estimado con Pentaur es $0.170 m^2 \cdot K/W$. Este valor, lejano al $0.29 m^2 \cdot K/W$ esperado, puede deberse

a alguna falencia en la metodología de medición, como el contacto defectuoso en algunas de las termocuplas. También, las condiciones de asoleamiento sobre la superficie externa son difíciles de ajustar mediante los modelos, donde la temperatura supera 40 °C sobre esta cara, en días claros. La medición en este periodo debería ser repetida para descartar errores en la metodología de medición.

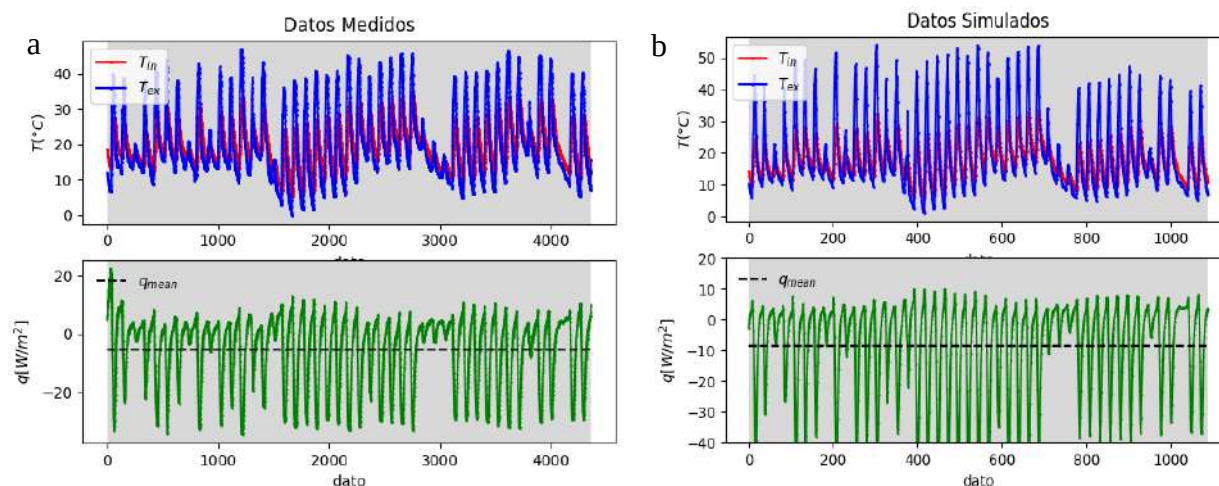


Fig. 7: Datos de alimentación a los modelos, para invierno: a) experimentales y b) simulados. El sombreado gris implica el periodo de datos utilizado en la determinación de R .

Los resultados para los periodos analizados, en base a mediciones in-situ, se presentan en la tabla 2. En dicha tabla, se incluyeron también los resultados obtenidos para “primavera”, periodo que no fue analizado en los apartados anteriores. Por cuestiones de extensión del trabajo, se prefirió acotar el análisis a tres estaciones bien diferenciadas. El error relativo al valor esperado teórico, es menor que 7% para todas las series de medición excepto para invierno (41%).

Tabla 2. Resumen de los resultados obtenidos con el método dinámico Pentaur.

	R_{conv}	$RMSD$	$Corr$	$STDr$	$BIAS$	datos usados %	k	Δk	C	$Er\%$
Verano	0.278	0.64	1	1.08	0.11	68	12	1	7	4.1
Otoño	0.298	2.78	1	0.98	2.50	74	12	1	16	2.8
Invierno	0.170	1.79	1	1.01	1.30	100	12	1	8	41.3
Primavera	0.308	2.14	0.99	1.04	1.63	100	6	1	7	6.2

Conclusiones

Se estimó la resistencia térmica de una pared liviana en condiciones de libre funcionamiento, asoleada debido a su orientación. Esto da lugar a las condiciones menos favorables para la aplicación de los métodos de estimación de R . Se concluye que la implementación del método dinámico Pentaur es útil y confiable en la determinación de R para la situación mencionada. Además, la convergencia y la exactitud del dato estimado, dependen de las condiciones meteorológicas y metodología de medición.

Con los datos tomados in situ, el método Pentaur responde de manera aceptable. Converge en todos los casos, con un máximo de 16 días para otoño. Las diferencias con respecto al valor esperado son menores al 7% para todos los

periodos excepto invierno, donde el valor encontrado es 41% menor al esperado. La convergencia de los métodos no asegura que el valor estimado de R sea cercano al valor real. Modificar el criterio de convergencia de los métodos podría dar lugar a la obtención de resultados con mayor exactitud. En este caso, este valor subestimado de R puede deberse, además, a errores en la preparación de los sensores. Las mediciones en este periodo deberían ser repetidas, para descartar errores en la instalación de los sensores.

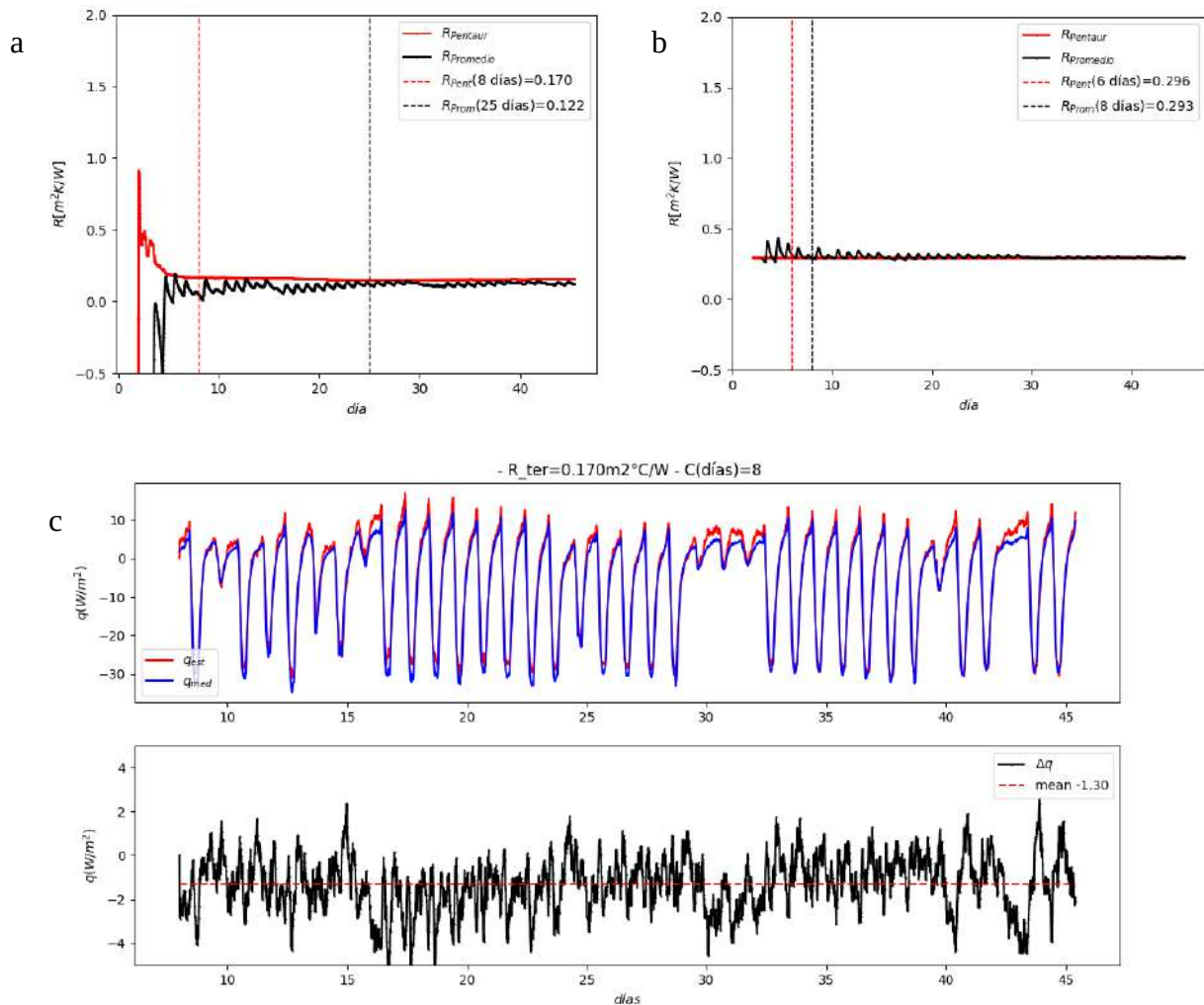


Fig. 8: Invierno, evolución del valor de R en el tiempo: a) datos experimentales y b) datos simulados, el valor y los días de convergencia se indican en la leyenda. En c) arriba: contraste entre q_{med} (azul) y q_{est} (rojo), abajo: diferencia entre ambos términos y valor medio de la diferencia, sólo para Pentaur.

Para las condiciones de medida establecidas, se recomienda trabajar con datos registrados cada 15 minutos, aumentando la capacidad de cubrir efectos de variación en las medidas. Los parámetros propios del método Pentaur, relacionados al tiempo de influencia, en donde las temperaturas y flujos de calor afectan la medida actual, deben setearse según el tipo de pared y las condiciones climáticas externas. Para ello, el usuario debe tener cierta experiencia para llevar a cabo la configuración de los parámetros del método. Para el caso de paredes poco masivas, un tiempo de influencia entre 6 y 12 horas sería suficiente (para la frecuencia de registro mencionada). En paredes masivas, la influencia temporal de las variables puede alcanzar intervalos de hasta 72 horas. Así, el método debe ser probado en paredes masivas y/o en paredes con mayor resistencia térmica siguiendo la modalidad de libre funcionamiento, que es



la condición de operación con mayor aleatoriedad y en caso de un desempeño adecuado, como el observado en este trabajo, asegurarían buenos resultados en otras condiciones (calefacción y/o refrigeración).

Agradecimientos

Proyecto CIUNSA N°2575: “Modelación y experimentación de sistemas de refrescamiento por acumulación estructural orientados a mejorar la eficiencia energética en edificios”. Director: Dr. Marcos Hongn. Adjudicación: 01/2019.

Referencias

- Anderlind G. (1996). GullfibR and Pentaur Models Two Models for Analysing In Situ Thermal Measurements on a Construction with One-dimensional Heat Flow. Proceedings of Building Physics'96, Espoo, Finland, September 9-10, 1996.
- Anderlind G. (2017). Comparison of two methods for analyzing in situ thermal measurements. Available at: https://www.researchgate.net/publication/318307463_Comparison_of_two_methods_for_Analyzing_In_Situ_Thermal_Measurements
- Atsonios I.A., Mandilaras I.D., Kontogeorgos D.A., Founti M.A., (2017). A comparative assessment of the standardized methods for the in-situ measurement of the thermal resistance of building walls, *Energy Build.* 154, 198–206.
- Bienvenido-Huertas D., Moyano J., Marín D., Fresco-Contreras R., (2019). Review of in situ methods for assessing the thermal transmittance of walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 102, 356–371.
- Cohelo Barros E., Angeloti P., Achcar J., Zangiacomí E., Shimano A. C., (2008). Métodos de estimação em regressão linear múltipla: aplicação a dados clínicos. *Revista Colombiana de Estadística*, vol. 31, no. 1, pp. 111-129.
- Deconinck A., Roels S., (2016). Comparison of characterisation methods determining the thermal resistance of building components from onsite measurements. *Energy and Buildings* 130, 309–320.
- Desogus, G., Mura, S., Ricciu, R., (2011). Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance. *Energy and Buildings* 43 (10), 2613–2620.
- EnergyPlus Manual, (2018). United States Department of Energy. <https://energyplus.net/documentation>
- EnergyPlus, (2018). United States Department of Energy, EnergyPlus Energy Simulation Software, <http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus>.
- Engerer N.A., (2015). Minute resolution estimates of the diffuse fraction of global irradiance for southeastern Australia. *Solar Energy* 116, pp 215–237.
- Evangelisti L. Guattari C., Asdrubali F., (2018). Influence of heating systems on thermal transmittance evaluations: Simulations, experimental measurements and data post-processing. *Energy & Buildings* 168, 180–190.
- Gaspar K., Casals M., Gangolells M., (2016). A comparison of standardized calculation methods for in situ measurements of facades U-value. *Energy and Buildings* 130, 592–599.
- IEA, (2017). International Energy Agency. Energy technology perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations. OECD/IEA 2017.
- ISO 9869, (2014). Thermal Insulation—Building Elements—In-Situ Measurements of Thermal Resistance and Thermal Transmittance, International Organization for Standardization, Geneva, 2014.
- Lucchi E., (2017). Thermal transmittance of historical stone masonries: a comparison among standard, calculated and measured data, *Energy Build.* 151, 393–405.
- Rasooli A., Itard L., Ferreira C.I., (2016). A response factor-based method for the rapid in-situ determination of wall's thermal resistance in existing buildings, *Energy Build.* 119, 51–61.
- Rotilio M., Cucchiella F., De Berardinis P., (2018). Thermal Transmittance Measurements of the Historical Masonries: Some Case Studies. *Energies*, 11(11), 2987.
- Roulet C., Gass J., Markus I., (1985). In-situ U-value measurement: reliable results in shorter time by dynamic interpretation of measured data, in: *Buildings III Conference*. <https://web.ornl.gov/sci/buildings/conf-archive/1985%20B3%20papers/057.pdf>
- SketchUp, (2018). Software for 3D modeling. Available at: <https://www.sketchup.com>
- Úrge-Vorsatz D., Cabeza L.F., Serrano S., Barreneche C., Petrichenko K., (2015). Heating and cooling energy trends and drivers in buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 41, pp. 85-98.