

DETERMINACIÓN IN SITU DE LA RESISTENCIA TÉRMICA DE MUROS EN EDIFICIOS HISTÓRICOS: MÉTODOS ESTACIONARIO Y DINÁMICOS

Marcos Hongn¹, Marcelo Valdéz¹, Silvana Flores Larsen², Camila Gea Salim, Silvina González
INENCO – Universidad Nacional de Salta – CONICET - Avda. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina
Tel. 0387-4255424 – Fax: 0387-4255389
E-mail: mhongn@unsa.edu.ar

Recibido 16/08/19, aceptado 23/10/19

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). Métodos dinámicos y estacionarios se han probado 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. El presente trabajo tiene como objetivo la determinación de R a través de medidas in situ, implementando dos métodos dinámicos: *Pentaur* y *Grey Box* (resistor-capacitor) y un modelo estacionario: *Promedio*, para un muro masivo correspondiente a un edificio histórico de la ciudad de Salta y para condiciones aleatorias de funcionamiento (libre). De los resultados obtenidos, cabe destacar que los métodos dinámicos tienen la capacidad de converger, en algunos días, a valores confiables de R dependiendo del periodo de datos seleccionados y de la correcta configuración en los parámetros de cada método.

Palabras clave: resistencia térmica, edificios históricos, funcionamiento libre, método Promedio, métodos dinámicos.

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, aún no hay restricciones o controles adecuados para los valores R de paredes y techos, 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,

¹ Investigador Asistente CONICET

² Investigador Adjunto CONICET

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 (redes RC, 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 y ASTM C 1155 son los más utilizados ya que 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). Por otro lado, los métodos dinámicos tienen mayor probabilidad de proporcionar resultados confiables, independientemente de las condiciones de medición, a costa de requerir la implementación de algoritmos complejos y de un análisis con más detalle de las series de datos medidos debido a su metodología sofisticada (Atsonios et al., 2017).

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). 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, sólo 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. Deconinck y Roels (2016) compararon los métodos cuasi-estacionarios (Promedio y Promedio Modificado) y los dinámicos (Pentaur, ARX y Estocásticos) para una pared lisa, 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. 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. Recientemente, Flores-Larsen et al., (2019) analizaron el comportamiento de diferentes métodos en la determinación de R , bajo condiciones de funcionamiento libre. En aquella ocasión, los autores midieron sobre una pared liviana de ladrillo hueco, con orientación norte (asoleada) y en distintas épocas del año. El método Pentaur arrojó los mejores resultados, obteniendo convergencia en todas las series (in-situ y simuladas). La convergencia se entiende como la tendencia a un valor estable de R (en el tiempo), cumpliendo con ciertos criterios de variabilidad preestablecidos. La correcta selección del rango de datos y de los parámetros, como el tiempo de influencia, son importantes para alcanzar valores representativos de R .

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 desfavorables y las más aleatorias en la medición in situ de R . En los edificios de funcionamiento libre, como los edificios históricos, no es posible, generalmente, mejorar las condiciones de los ensayos mediante el forzamiento de la temperatura interna de los locales ya que las temperaturas de las salas suelen oscilar dentro de un rango controlado. Por ejemplo, Genova y Fatta (2018) resaltaron las dificultades para cumplimentar los requerimientos descritos en ISO 9869 para muros masivos de piedra en un convento en Palermo, Italia. Para determinar la resistencia térmica, los autores llevaron a cabo 16 tandas de medición *in-situ* en periodos de verano e invierno, con periodos de duración entre 6 y 21 días. Los autores también concluyeron que, en algunos casos, a pesar de haber logrado cumplir los criterios de convergencia, los valores de R para paredes similares diferían mucho entre sí. Otro desafío en los edificios históricos de *funcionamiento libre* es la presencia de la gran masa térmica de paredes con gran espesor. En estos casos, incluso aumentar el período de

medición no garantiza que se logre la convergencia, para el caso de climas templados (Desogus *et al.*, 2011).

En el presente trabajo, se estimó la resistencia térmica de una pared de gran masa térmica correspondiente al Cabildo de la ciudad de Salta, un edificio histórico, para el cual no se dispone de información fehaciente sobre la tipología de sus muros. Para ello, se tomaron mediciones en condiciones de funcionamiento libre, y se implementaron los métodos dinámicos Pentaur (Anderlind,1996), y Grey Box (modelo tipo circuito eléctrico R-2C), y el modelo estacionario promedio (ISO 9869). La determinación de las propiedades térmicas de las edificaciones históricas es de vital importancia ya que permite dilucidar su tipología constructiva (material constructivo principal) y, en consecuencia, definir las estrategias de acondicionamiento térmico más adecuadas. Las metodologías de medición, las propuestas de aplicación de métodos de estimación de resistencia térmica de materiales, y los resultados de este trabajo son aportes novedosos que contribuirán en la rehabilitación de edificios históricos en la Argentina, como así también, en las tareas de etiquetado de viviendas³ en un futuro cercano.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Cabildo de Salta

El Cabildo de Salta, construido alrededor de 1780, es sede actual del Museo Histórico del Norte. Éste se encuentra ubicado frente a la plaza principal de la provincia (fig. 1a). Las tareas de restauración en la década de 1940 pusieron en evidencia la coexistencia de construcciones de distinto tipo y épocas: hay partes de adobe, con muros de gran espesor, otras de ladrillo y gran parte de piedra (Buschiazzo, 1959).



Figura 1: a) Cabildo de Salta, vista de la fachada norte. Muro sensado, b) lado externo y c) lado interno.

Para llevar a cabo el estudio, se colocaron los sensores en el muro de la oficina de investigación y extensión sobre la planta alta de la construcción. Debido a la falta de documentación fehaciente, se desconocen los detalles constructivos del muro analizado. El mismo cuenta con un espesor de 0.63 m y divide el ambiente interno de una galería externa orientada hacia el sur (fig. 1b), por lo que dicha superficie no recibe radiación solar directa. Se presume que los muros de esta ala del edificio están contruidos de adobe, material cuya conductividad térmica varía entre 0.4 y 0.8 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ dependiendo de su densidad, entre otros factores, Cuitiño *et al.*, (2015).

Las mediciones fueron realizadas durante 26 días, entre el 1 y el 27 de Julio del año 2019. Los registros de datos se tomaron con un intervalo de 15 minutos.

Equipos y medición

³ <https://www.argentina.gob.ar/energia/ahorro-y-eficiencia-energetica/vivienda/programa-nacional-de-etiquetado-de-viviendas>

Para aplicar los métodos, se requiere del registro de las temperaturas superficiales de la pared (interna y externa) y la tasa de flujo de calor a través de la misma. Las temperaturas se midieron 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). 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, fig.1b, y cerca del termopar interno. La resistencia térmica de los sensores de flujo de calor es inferior a $6.25 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{K W}^{-1}$ y puede considerarse despreciable en relación con la resistencia térmica total de la pared estudiada. La sensibilidad del sensor es de $61.26 \mu\text{V W}^{-1}\text{m}^2$ y está conectado a un sistema de adquisición de datos NOVUS LOGBOX-AA IP65.

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 de la cara interna de la pared, respectivamente. Este método funciona adecuadamente si la temperatura exterior es siempre 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 múltiples 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 difiere más del $\pm 5\%$ del valor obtenido 24 horas antes. Además, la diferencia entre el valor R obtenido en los primeros 2/3 del tiempo de medición y en los últimos 2/3 del mismo no debe superar el 5%. Si estos criterios se cumplen, es necesario extender el tiempo de medición o bien reiniciarse la toma de datos.

Método Pentaur de Anderlind

El modelo Pentaur se clasifica como un modelo estadístico auto-regresivo con variables exógenas (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 las variaciones 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:

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

donde k es el número de pasos de tiempo (pasado) considerados significativos (el "tiempo de influencia", un valor entre 12 y 48 horas), 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 . La evidencia muestra que el modelo Pentaur es efectivo en la mayoría de los casos experimentales, incluso en paredes multicapa no simétricas con alta masa térmica (Anderlind, 1996), o cuando el flujo de calor es muy bajo, por ejemplo, en verano (Anderlind, 2017). En este trabajo, se consideró que la convergencia de los métodos dinámicos se alcanza cuando al menos transcurrieron 72 horas de medición, cuando 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). La programación de estos dos primeros métodos se realizó en Python 3.6.

Método Grey Box para un circuito del tipo R2C

Los modelos de redes RC simplifican la descripción de la transferencia de calor en un espacio mediante la consideración del calor transferido entre nodos en un circuito eléctrico equivalente. Estos circuitos incluyen resistencias y capacitores (capacidad térmica del elemento) en diferentes configuraciones para representar el equivalente térmico. Seem (1987) propuso una configuración sencilla R2C para describir el comportamiento térmico de un muro simple, indicado de manera esquemática en la fig. 2. En este caso, el muro de espesor $e(m)$, conductividad térmica k ($Wm^{-1}K^{-1}$), densidad ρ ($kg\ m^{-3}$) y calor específico c_p ($J\ kg^{-1}K^{-1}$) se representa mediante dos nodos con un capacitor en cada uno (donde $C\left(\frac{J}{m^2K}\right) = \rho c_p e$), y una resistencia $R\left(\frac{m^2K}{W}\right) = \frac{e}{k}$ conectando ambos nodos. Este mismo modelo puede obtenerse partiendo de la ecuación de calor unidimensional, al aplicar diferencias finitas a las derivadas espaciales de la densidad de flujo. Si se considera una discretización del muro con un único nodo interior y un nodo sobre cada una de las caras se puede mostrar que para el nodo en la cara interior se obtiene lo siguiente:

$$\frac{dT_{in}}{dt} = -\frac{T_{in} - T_{ex}}{RC} + \frac{q_{in}''}{C} \quad (3)$$

Esta ecuación diferencial, fija la estructura matemática del modelo, pero contiene los parámetros desconocidos R y C , los cuales serán estimados empíricamente, ajustando los datos de las mediciones. Este método es en consecuencia un método de caja gris (Grey Box Modeling). El ajuste de los parámetros R y C se realizó mediante el System Identification Toolbox⁴ de Matlab, el cual posee funciones especiales para el modelado con caja gris. En la ec. (3) la variable estimada es T_{in} , conocidas las entradas T_{ex} y q_{in}'' . Esto difiere del modelo Pentaur el cual estima los valores de q_{in}'' . Distintos valores de R y C se obtienen ajustando el modelo a series de datos progresivamente más grandes. Esto permite analizar la sensibilidad de los parámetros a la cantidad de datos empleados. Los criterios de convergencia de estos parámetros son los descritos en el apartado anterior.

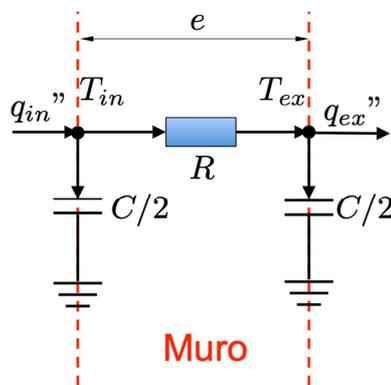


Figura 2: Circuito R2C para caracterizar la transferencia de calor en un muro simple, Seem (1987).

⁴ <https://au.mathworks.com/help/ident/grey-box-model-estimation.html>

RESULTADOS

De los 2950 datos registrados, como lo indica la fig. 3, se utilizaron los registros desde el sexto día de medida (pintados en amarillo). Esta selección tiene lugar desde el punto de vista de la estabilidad y convergencia de los métodos, ya que los resultados presentan mayor exactitud cuando los datos, con los que se determinan los parámetros, presentan mayor uniformidad. Al inicio de la tanda de medida, se observa intermitencia entre días soleados y nublados, y probablemente el encendido de calefacción auxiliar (calo-ventor) hasta el 4to o 5to día. Luego, y como se pretende medir bajo condiciones de aleatoriedad (funcionamiento libre), se observa una secuencia de varios días despejados (en donde no se encendió la calefacción debido al poco uso de la oficina) por lo que se aplican los métodos desde el rango mencionado. Cabe mencionar que, una vez alcanzada la convergencia, se almacenan los parámetros R y C , según el modelo, y se procede a validar los resultados empleando el rango de datos desde el día de convergencia hasta el final de los datos. De la fig. 3, los periodos de validación se establecen desde la línea vertical punteada negra, para Pentaur, y desde la línea punteada gris, para R2C. Por otro lado, el método Promedio no permite realizar un contraste entre datos medidos y simulados debido a su formulación.

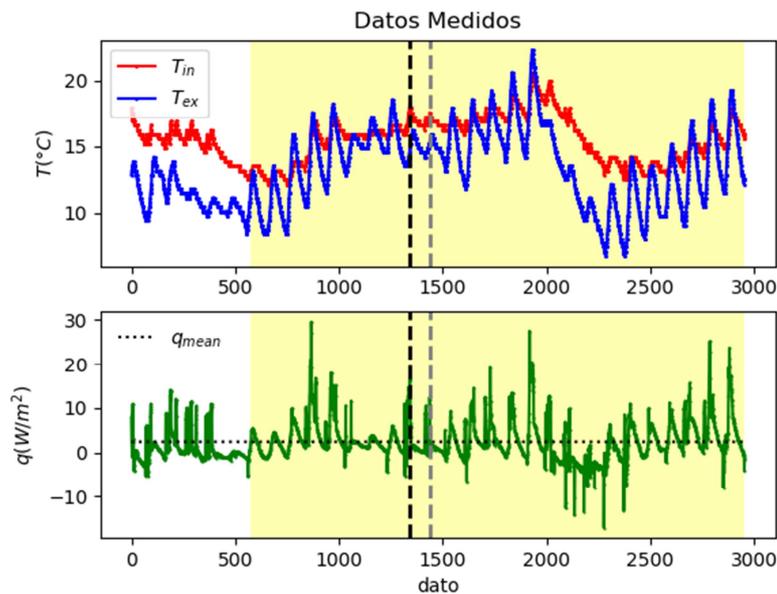


Figura 3: Datos medidos: temperaturas interna y externa sobre superficie, arriba, y tasa de flujo de calor, abajo. Días de convergencia (líneas verticales): en negro Pentaur y en gris R2C.

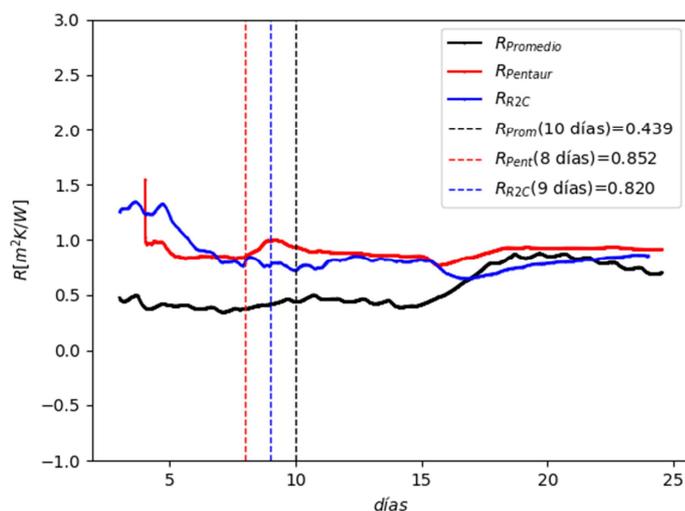


Figura 4: Valores de R obtenidos con los diferentes métodos: Promedio (curva negra), Pentaur (curva roja) y R2C (curva azul). Los días de convergencia se representan mediante líneas punteadas verticales.

La evolución de los valores de R , determinados con cada modelo, se muestran en la fig. 4. El modelo Pentaur converge luego de 8 días a un valor de $0.852 \text{ m}^2\text{K W}^{-1}$. Las fluctuaciones del día 9 y 17 se deben a los cambios abruptos en la tendencia de los datos (condiciones meteorológicas), esto se repite en los otros modelos. En este caso, para el modelo Pentaur se empleó un tiempo de influencia de 24 horas con una frecuencia de 4 datos por hora. Este tiempo de influencia puede incrementarse a 36 horas, ya que la pared posee gran masa, ganando exactitud en la predicción, pero alcanzando la convergencia en 12 días. El modelo R2C, resuelto con el método *grey box*, estima un valor de resistencia de $0.820 \text{ m}^2\text{K W}^{-1}$ convergiendo luego de 9 días, según los criterios establecidos en el apartado anterior. Éste modelo, además, estima valores de capacidad térmica. Se determinó un valor de $C = 7.29 \times 10^5 \text{ J m}^{-2}\text{K}$, al alcanzar la convergencia mencionada. El valor teórico de C puede encontrarse en un rango entre 6.8 y $8.5 \times 10^5 \text{ J m}^{-2}\text{K}$, para densidades entre 1300 y $1600 \text{ (kg m}^{-3}\text{)}$, para una capacidad calorífica de $840 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$. El método Promedio, por otro lado, llega a la convergencia luego de 10 días, alcanzando un valor de $0.439 \text{ m}^2\text{K W}^{-1}$. La inversión en la dirección del flujo de calor a través de la pared (valores positivos y negativos) es la principal causa de la significativa subestimación del valor de R a través del método Promedio, ya que no es recomendable su aplicación en tales condiciones. Sin embargo, entre los días 17 y 21, donde el flujo de calor se mantuvo negativo (sin cambiar dirección), el método estima valores de R similares a los métodos dinámicos. Cabe destacar también, como se mencionó con anterioridad, que los criterios de convergencia entre los métodos dinámicos y estacionarios, difieren en rigurosidad.

Los métodos dinámicos indicarían que el material del muro es adobe, donde el valor de resistencia térmica teórica puede variar entre 0.79 y $1.0 \text{ m}^2\text{K W}^{-1}$ suponiendo una conductividad térmica entre 0.6 y $0.8 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, para un espesor de 0.63 m .

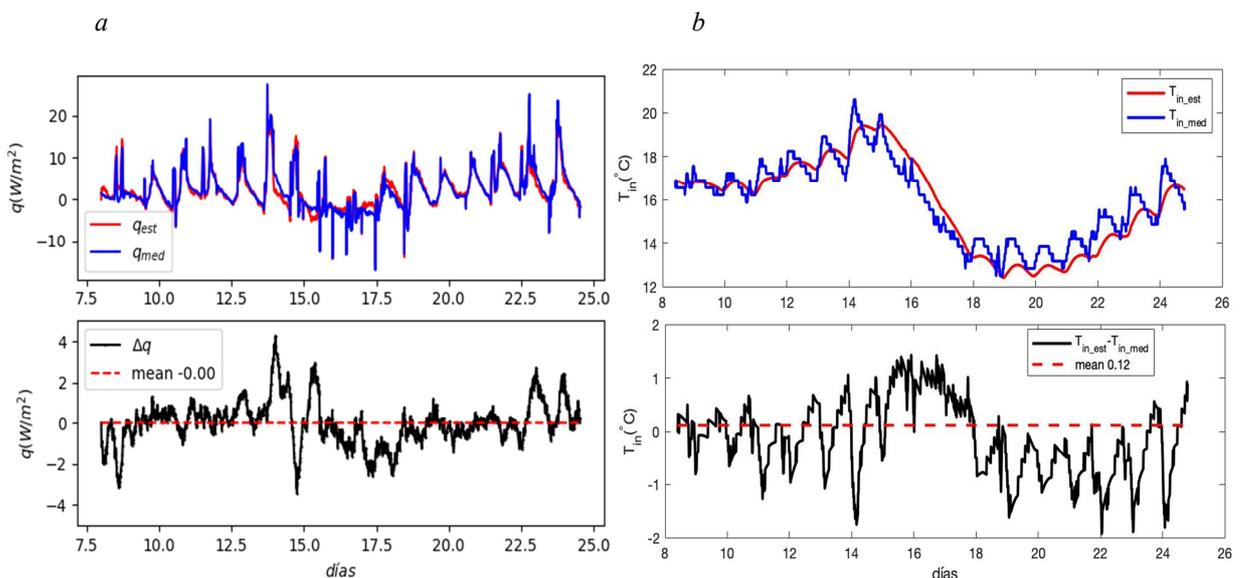


Figura 5: Contraste entre datos medidos versus estimados, a) tasa de flujo de calor, estimada con Pentaur (rojo) y medida (azul), en b) temperatura superficial interna estimada con el modelo R2C (rojo) y medida (azul).

El ajuste entre datos simulados, mediante los métodos dinámicos, y los datos experimentales se muestra en la fig. 5. Cualitativamente, se puede observar que el modelo Pentaur reproduce adecuadamente los datos experimentales obtenidos, cuando R , en la ec. (2), se fija en el valor de convergencia ($0.852 \text{ m}^2\text{K W}^{-1}$). Además, en el periodo de validación (fig. 5a-inferior), se observa que el promedio del error en el flujo de calor estimado es cero, siendo este error más significativo en los periodos con mayor variación de las condiciones meteorológicas (cercano al día 15). El adecuado ajuste se verifica cuantitativamente desde los parámetros estadísticos mostrados en tabla 1.

Si bien el método de resolución por medio de caja gris implica conocer y desarrollar las ecuaciones físicas, la simplicidad de la red térmica R2C da lugar a valores estimados de temperatura interna superficial con una exactitud menor al caso anterior. El modelo tiene sus fundamentos en la implementación de excitaciones sinusoidales (temperatura superficial y flujo de calor) para la

determinación de los parámetros característicos de la red R y C . Esto da lugar a que los valores simulados capturen la tendencia de la temperatura medida, aunque no es posible representar la evolución detallada de la misma, fig. 5b. Aun así, el ajuste es aceptable y el valor de la resistencia térmica que se determinó es confiable. El grado de ajuste entre las series de datos, se describe en término de los parámetros estadísticos *raíz del error cuadrático medio normalizado* (NRMSE), *coeficiente de correlación* (Corr) y *desvío estándar relativo* (STDr), para el rango de datos utilizados para validación (una vez alcanzada la convergencia). Estos valores se presentan en la tabla 1. Los indicadores estadísticos empleados se definen en las ecs. (4), (5) y (6) a continuación:

$$\text{NRMSE} = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

$$\text{Corr} = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{N\sigma_x\sigma_y} \quad (5)$$

$$\text{STDr} = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \quad (6)$$

Donde x_i e y_i son los valores estimados y medidos, respectivamente, \bar{x} es el valor medio de las estimaciones e \bar{y} el valor medio de las observaciones, mientras que σ_x y σ_y son las desviaciones estándar de las estimaciones y mediciones, respectivamente.

	<i>Promedio</i>	<i>Pentaur</i>	<i>Grey Box</i>
R (m ² K/W)	0.439	0.852	0.820
C (J/m ² K)	-	-	7.29x10 ⁵
Días para Convergencia	10	8	9
Validación (una vez alcanzada la convergencia)			
NRMSE	-	0.77	0.62
Corr	-	0.97	0.94
STDr	-	0.97	1.13

Tabla 1: Resumen de los resultados y análisis estadístico del periodo de validación.

CONCLUSIONES

Se propusieron dos modelos dinámicos como Pentaur y red térmica R2C-*grey box*, y el modelo estacionario (método Promedio) establecido por la norma ISO 9869, para estimar la resistencia térmica de un muro de gran masa térmica. Basado en la similitud de valores de R obtenido con los métodos dinámicos, y el nivel de confianza en el modelo Pentaur, el cual ha sido probado con éxito en otras tipologías constructivas, se puede conjeturar que el muro monitoreado está construido en su mayoría con bloques de adobe. Se observó que el método promedio converge en 10 días a un valor más pequeño de lo esperado, esto se debe a las condiciones altamente fluctuantes en las temperaturas superficiales y flujo de calor. Por esto, la convergencia del método estacionario no asegura la obtención de un valor confiable de R en esta situación y no se recomienda la implementación de éste método bajo condiciones de funcionamiento libre. El método Pentaur obtiene un valor confiable de resistencia térmica con la menor cantidad de datos experimentales (convergencia en 8 días). Para el periodo de validación, los datos simulados ajustan adecuadamente los datos medidos a juzgar por los valores de correlación y desvío estándar relativo obtenidos. Por otro lado, el modelo de caja gris (R2C), además de la resistencia térmica, estima la capacidad térmica del material, asociada con su densidad y calor específico. Este modelo converge al valor de R luego de 9 días de medición. La simplicidad en la configuración de la red térmica hace que sólo dos parámetros, R y C , sean necesarios para describir el fenómeno de transmisión de calor en el muro, en contraste con modelo Pentaur que requiere 289 parámetros siendo sólo uno de ellos de interés ($1/R$). Los valores de resistencia térmica obtenidos con los modelos dinámicos se encuentran dentro del rango teórico estipulado para el adobe, inclusive el valor de capacidad térmica determinado con el modelo de caja gris. No es posible la comparación de los valores estimados a partir de un valor teórico ya que no se dispone de la

información constructiva del muro. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, el modelo Pentaur ha sido verificado en condiciones similares en otros muros por lo que brinda confianza sobre el valor de resistencia obtenido. Además, el modelo R2C también arrojó valores similares.

Por último, se destaca que la importancia de este trabajo radica en que sienta un precedente sobre la utilización de los métodos de estimación (mostrando cuales son adecuados y cuales no) y la metodología de medición en condiciones libres para muros de gran masa térmica. Se muestra que ambos métodos dinámicos requieren al menos 10 días de mediciones para obtener un valor confiable de resistencia térmica. Este trabajo puede constituir una referencia importante para las tareas de relevamiento de construcciones cuyo tipo constructivo es desconocido (tales como los edificios históricos) y así beneficiar a otras actividades que requieren la información obtenida (reacondicionamiento de edificios, etiquetado energético, etc.) Por ejemplo, los resultados de este trabajo pueden emplearse para acotar los tiempos de medición en base al tiempo de convergencia de métodos dinámicos.

Como trabajo futuro, se propone la implementación de redes neuronales (caja negra) para captar con detalle el comportamiento térmico de la pared frente a cambios en las temperaturas superficiales, el entrenamiento se deberá realizar mediante algún modelo propuesto para obtener, finalmente, la resistencia térmica que se encontrará implícita en los resultados.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo se desarrolló en el marco del proyecto CIUNSa-B N°2575: “Modelación y experimentación de sistemas de refrescamiento por acumulación estructural orientados a mejorar la eficiencia energética en edificios”.

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.
- Buschiazzo M, (1959). Argentina: Monumentos históricos y arqueológicos. Instituto Panamericano de Geografía e Historia. Vol XI.
- 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.
- Cuitiño, G., Esteves, A., Maldonado, G., Rotondaro, R., (2015). Análisis de la transmitancia térmica y resistencia al impacto de los muros de quincha. Informes de la Construcción, 67(537): e063, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.12.082>.
- 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.
- 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.

- Flores-Larsen S., Hongn M., Castro N., González S., (2019). Comparison of four in-situ methods for the determination of walls thermal resistance in free-running buildings with alternating heat flux in different seasons. *Construction and Building Materials* 224, 455-473.
- 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.
- Genova E., Fatta G., (2018). The thermal performances of historic masonry: In-situ measurements of thermal conductance on calcarenite stone walls in Palermo. *Energy & Buildings* 168, 363-373.
- 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>
- Ürge-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.

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 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. The objective of this work is to determinate the R-value for a massive wall in a historical building for free-running conditions, employing two dynamics methods: Pentaur and Grey Box (resistor-capacitor model) and the Average stationary method indicated in ISO 9869. From the obtained results, it can be said that the dynamic methods reached convergence in few days to reliable R-values, depending on the period of data selected and the correct setting of the parameters for each model.

Keywords: Thermal resistance, historical buildings, free-running building, average method, dynamic methods.