

COMPARACIÓN DE TRES MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA TÉRMICA DE MUROS A PARTIR DE DATOS MEDIDOS

Nicolás Castro (1), Silvana Flores Larsen (2), Silvina González (3) y Marcos Hongn (4)

(1) Becario Doctoral ANPCYT, Licenciado en Física, nicocastro7@gmail.com

(2) PhD., Investigadora Adjunta de CONICET, seflores@unsa.edu.ar

(3) MSc., Ingeniera Industrial, Profesional de Apoyo CONICET, ing.silvina.gonzalez@gmail.com

(4) PhD., Becario Post-doctoral de CONICET, marcoshongn@gmail.com

Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Universidad Nacional de Salta – CONICET, Avda. Bolivia 5150 (4400) Salta, Argentina, Tel: +54 387 4255578

RESUMEN

La resistencia térmica R de la envolvente es uno de los factores más importantes que afectan a la performance térmica de un edificio. Una determinación confiable de R in-situ es necesaria para la evaluación real de esta performance. Para determinar R a partir de mediciones existen diversos métodos que asumen condiciones estacionarias o dinámicas. El objetivo de este trabajo es la comparación de tres métodos para el cálculo de R a partir de mediciones de temperaturas superficiales y de flujo de calor en un prototipo de casilla, durante el verano. Se implementaron en Python los métodos: promedio (estacionario y con correcciones por acumulación), de Anderlind (dinámico) y de Fourier de analogía eléctrica (dinámico). Se comparó el tiempo de convergencia de los métodos y su aplicabilidad según las condiciones experimentales. Los resultados encontrados para R resultaron aceptables con la condición de tener períodos de mediciones extendidos (más de 30 días) y con una diferencia máxima entre ellos del 20%.

Palabras-clave: resistencia térmica, método promedio, método dinámico, método de Anderlind.

ABSTRACT

The thermal resistance R of the envelope is one of the most important factors that affect the thermal performance of a building. A reliable estimate of R is necessary for the real evaluation of the thermal performance. There are several methods for determining R for on-site measurements that assume stationary or dynamic conditions. The objective of this work is the comparison between three methods for calculating R from superficial temperatures and heat flux measurements, in a building prototype in summer conditions. Three methods were implemented in Python language: average method (stationary and with storage corrections), Anderlind's method (dynamic) and the Fourier transform based on thermic-electric analogy (dynamic). The convergence time was compared and the method's applicability depending on experimental conditions. The results obtained were acceptable under the conditions of having long measurement times (more than 30 days), and the different methods showed a maximum difference of 20% in the results for R .

Keywords: Thermal resistance, average method, dynamic method, Anderlind method.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente los edificios consumen a nivel global, aproximadamente un 30% de la energía final (IPEEC, 2015) y se espera que este porcentaje crezca en el futuro con el crecimiento de las poblaciones urbanas. Por ejemplo, entre 2000 y 2012 el consumo de los edificios a nivel mundial se incrementó en un 18%, y de continuar esta tendencia, se estima que dicho consumo se incrementará en un 50% desde 2012 a 2050.

La reciente incorporación de la Argentina al IPEEC (Alianza Internacional para la Cooperación en Eficiencia Energética) en marzo de 2017, implica un gran desafío para el país. Este organismo cuenta con 16 miembros pertenecientes al grupo de las 20 (G20) economías que representan más del 75% del consumo mundial de energía y de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (IPEEC, 2015). El objetivo es trabajar conjuntamente en la implementación de políticas y medidas de eficiencia energética. Una de las principales y más efectivas herramientas para reducir el consumo energético de los edificios en escala masiva y a largo plazo es la legislación (standards, regulaciones, normativas, etc.). En el IPEEC, el grupo de trabajo BEET (Building Energy Efficiency Taskgroup) destacó entre los temas de mayor interés a desarrollar de manera conjunta el desarrollo de métodos para comparar la performance energética de edificios medida in-situ con los resultados requeridos por los estándares de cada país.

Uno de los factores más importantes que afectan la performance energética es la resistencia térmica R de la envolvente. Para sistemas constructivos bien conocidos, los valores de resistencia térmica se encuentran tabulados en las normas o se pueden obtener de los datos del fabricante. Sin embargo, en la realidad existen otros factores que modifican la resistencia térmica, como el método de construcción (espesor de revoques, preparado de la mezcla, etc.), inhomogeneidades, envejecimiento, humedecimiento, y factores relacionados con la misma mano de obra. Por esta razón, las mediciones in-situ de las propiedades térmicas de la envolvente, tal y como fue construida, es una temática que ha cobrado protagonismo en los últimos años (Cesaratto y De Carli, 2013; Byrne et al., 2013; Biddulph et al., 2014; Roels et al., 2015).

La resistencia térmica R puede determinarse a partir de medidas de las temperaturas superficiales interior y exterior del muro y del flujo de calor a través del mismo. Existen dos grandes grupos de métodos: los de estado estacionario y los dinámicos. Los primeros requieren de largos periodos de tiempo, están limitados a ciertas estaciones del año (principalmente invierno) y tienden a eliminar el efecto de la masa térmica. Los segundos, en cambio, pueden aplicarse a un rango más amplio de condiciones meteorológicas y permiten obtener información relacionada con la masa térmica del muro (Deconinck, 2016).

2. OBJETIVO

El presente trabajo realiza una comparación de tres métodos diferentes para estimar la resistencia térmica del muro de un prototipo a partir de datos medidos durante el verano 2016-2017. Se comparan el método promedio convencional (estacionario y con correcciones por acumulación), el método de Anderlind (dinámico) y el método de la transformada de Fourier (dinámico) y se discute las limitaciones de cada uno cuando se utilizan en períodos de verano.

3. MÉTODO

Se describen a continuación los distintos métodos utilizados para el cálculo de la resistencia térmica (R) de un elemento de muro.

3.1. Método promedio (ISO 9869-2014)

Es el método más generalmente aceptado y se basa en la suposición de condiciones cuasi-estacionarias de medida. Calcula la resistencia R del elemento [m^2K/W] como:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^N (T_{si,j} - T_{se,j})}{\sum_{j=1}^N q_j} \quad (\text{Eq. 1})$$

donde:

$T_{si,j}$ y $T_{se,j}$ son las temperaturas superficiales internas y externas respectivamente para la medición j [$^{\circ}C$].

q_j es el flujo de calor a través del elemento de muro en el instante j [W/m^2].

N es el número de datos totales medidos.

El método supone que todo el flujo de calor medido desde el interior ha atravesado el componente edificio, lo cual sólo es cierto si las cantidades de calor almacenado en el elemento son iguales al principio y al final de las mediciones. Dado que las condiciones estacionarias difícilmente se encuentren en situaciones experimentales, este método considera el promedio de los datos como una aproximación a las medidas bajo condiciones estacionarias. Para que esta aproximación tenga validez son necesarias las siguientes condiciones: los promedios deben ser tomados en un período suficientemente largo de tiempo, el flujo de calor que atraviesa el elemento debe ser mucho mayor que la tasa de cambio de la energía almacenada (difícil de alcanzar en verano), y las propiedades térmicas de los materiales componentes son constantes durante el ensayo.

3.1.1. Corrección por masa térmica

La norma ISO 9869 sugiere una corrección para tener en cuenta los efectos de la masa térmica:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^N (T_{si,j} - T_{se,j})}{\sum_{j=1}^N q_j - \frac{F_i \delta T_i + F_e \delta T_e}{\Delta t}} \quad (\text{Eq. 2})$$

donde:

F_i y F_e son los factores de masa térmicos internos y externos respectivamente (cuyos valores se describen en la norma) [J/m²K].

δT_i (δT_e) es la diferencia entre el promedio de la temperatura interna (externa) 24 horas antes de la medición y el promedio de la temperatura interna (externa) durante las primeras 24 horas del período de análisis [K].

Δt es el intervalo de tiempo entre dos mediciones [s].

3.2. Método de Anderlind

Este método incluye las variaciones de flujo de calor a través de las componentes de un edificio considerando tanto el estado estacionario como el transitorio, se resuelve por regresión lineal múltiple, según la Ecuación 3:

$$q_j = \frac{1}{R} (T_{si,j} - T_{se,j}) + \sum_{n=0}^{15} X_n (T_{si,j-n+dt} - T_{si,j-(n-1)+dt}) + \sum_{m=0}^{20} Y_m (T_{se,j-m+dt} - T_{se,j-(m+1)+dt}) + Z (T_{si,j+1/2} - T_{si,j-1/2}) \quad (\text{Eq. 3})$$

donde dt es el salto de tiempo considerado [horas], el índice j indica la posición de la fila y considera un salto de 1/2 hora, y los parámetros R , X_n , Y_m y Z son los parámetros de la regresión múltiple. Los valores recomendados por la bibliografía para dt es de 2 horas (Anderlind, 1992).

El primer término de la Ecuación 3 representa las variaciones del flujo de calor debido a los cambios estacionarios de las temperaturas superficiales, mientras que el segundo y tercer término representan las fluctuaciones instantáneas en el flujo de calor debido a los cambios de temperatura del pasado, de las superficies interior y exterior. El último término considera la influencia que puede tener la lectura de los medidores de flujo cuando es sometido a los cambios de temperatura. Es un término que se agrega para reducir el error estándar.

La ventaja de éste método es que, el efecto en el las medidas de flujo de calor debido a las variaciones en las condiciones climáticas, se vean representadas en el término de la parte transitoria mientras que el efecto del estado estacionario queda aislado en el primer término de la ecuación y de esta manera se puede despejar fácilmente la resistencia térmica de la pared del edificio. La aplicación del método de regresión de Anderlind es directa y sencilla, solo se debe establecer cuantas diferencias de temperaturas del pasado se incluirán en el modelo. En este trabajo se tomaron diferencias de temperaturas de hasta 10 horas atrás y los datos tienen un tiempo de muestra de 30 minutos.

3.3. Método de Fourier basado en la analogía eléctrica

El método de Fourier es un método dinámico basado en la analogía térmico – eléctrica. En su forma más simple, la analogía eléctrica de un muro sujeto a temperaturas superficiales interior y exterior T_{sup} , $ext(t)$ y T_{sup} , $int(t)$ puede representarse como un circuito de dos resistencias similares y un capacitor, como se muestra en la figura 1.

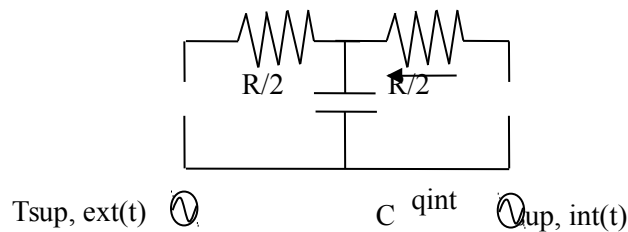


Figura 1: Analogía eléctrica de un muro con un capacitor y dos resistencias.

Si las fuentes son senoidales, este circuito es de sencilla resolución, pudiéndose encontrar la resistencia total R a partir de las temperaturas superficiales y el flujo de calor q . En general, Las temperaturas superficiales no son puramente senoidales, por lo que se utiliza un desarrollo en serie de Fourier para representarlas como una sumatoria de ondas senoidales. El principio de superposición permite entonces obtener el valor de R con la Ecuación 4:

$$R = \frac{|Y_{sup,ext}(0) - Y_{sup,int}(0)|}{|Y_{q,int}(0)|} \quad (\text{Eq. 4})$$

donde:

$Y_{sup,ext}(0)$ es la transformada Discreta de Fourier (DFT) de los datos de temperatura superficial interior medidos, para la frecuencia $\omega = 0$.

$Y_{sup,int}(0)$ es la DFT de los datos de temperatura superficial interior medidos, para $\omega = 0$.

$Y_{q,int}(0)$ es la DFT de los datos de flujo de calor interior medidos, para $\omega = 0$.

Las componentes de la transformada discreta de Fourier de una señal muestreada con N valores $f[0]$ a $f[N-1]$ y un periodo de muestreo de T , se calculan según la Ecuación 5:

$$Y[n] = \sum_{k=0}^{N-1} f[k] e^{-j \frac{2\pi}{N} nk} \quad (\text{Eq. 5})$$

Si bien en este trabajo nos remitimos exclusivamente a la resistencia, cabe destacar que también es posible encontrar la masa térmica mediante la aplicación de éste método dinámico.

3.3. Descripción del muro y medidas experimentales

Las medidas se realizaron sobre el muro orientado al Norte, de una casilla experimental ubicada en el Campus del INENCO, en la Universidad Nacional de Salta. La casilla está construida en ladrillos cerámicos huecos, y se encuentra revocada solo del lado interno.

Se realizaron medidas de temperatura superficial sobre la pared Norte, del lado externo e interno, de la temperatura ambiente en el exterior e interior de la casilla y medidas de flujo de calor a través de un elemento representativo de la pared Norte. Las medidas de temperatura sobre las paredes se tomaron con termocuplas conectadas a dataloggers HOBO, con los que también se registró la temperatura del aire en el interior de la casilla. La temperatura ambiente (exterior) se registró con una estación meteorológica Vantage Pro II ubicada en la terraza del edificio del INENCO, a unos 50 metros de la casilla experimental. Las medidas de flujo de calor fueron tomadas con un sensor Hukseflux HFP01, y registradas con un datalogger NOVUS.

Tabla1: Características térmicas de la pared a medir.

	e [m]	R [m^2K/W]	C [kJ/m^2K]
Ladrillo hueco	0,12	0,48	126
Revoque	0,025	0,258	39,9

En la Tabla 1 se muestran las características térmicas del muro a medir, e representa el espesor del elemento en metros, R la resistencia térmica estimada [m^2K/W] y C la capacidad térmica de cada elemento [kJ/m^2K]. Estas características térmicas se estimaron a partir de elementos constructivos similares

caracterizados en las normas IRAM (IRAM 11601, 2002) y se utilizaron para realizar las correcciones por masa térmica necesarias para el método promedio corregido.

Se tomaron medidas en un período de verano, entre el día 16 de diciembre de 2016 y el día 6 de febrero de 2017, en un total de 52 días. Cabe aclarar que las ventanas y puertas de la casilla permanecieron cerradas y no se dispuso de ningún sistema de refrigeración ni calefacción dentro de la casilla, lo que resultó en una variabilidad térmica reducida entre el interior y el exterior.



Figura 2: Muro Norte de la casilla experimental donde se realizaron las mediciones.

Los datos obtenidos se procesaron y los distintos métodos de cálculo se implementaron en el lenguaje de programación Python™, de código abierto.

4. RESULTADOS

Se presentan a continuación los resultados experimentales de las medidas de temperaturas interna y externa del muro Norte ($^{\circ}\text{C}$) y el flujo de calor a través de sus componentes (W/m^2).

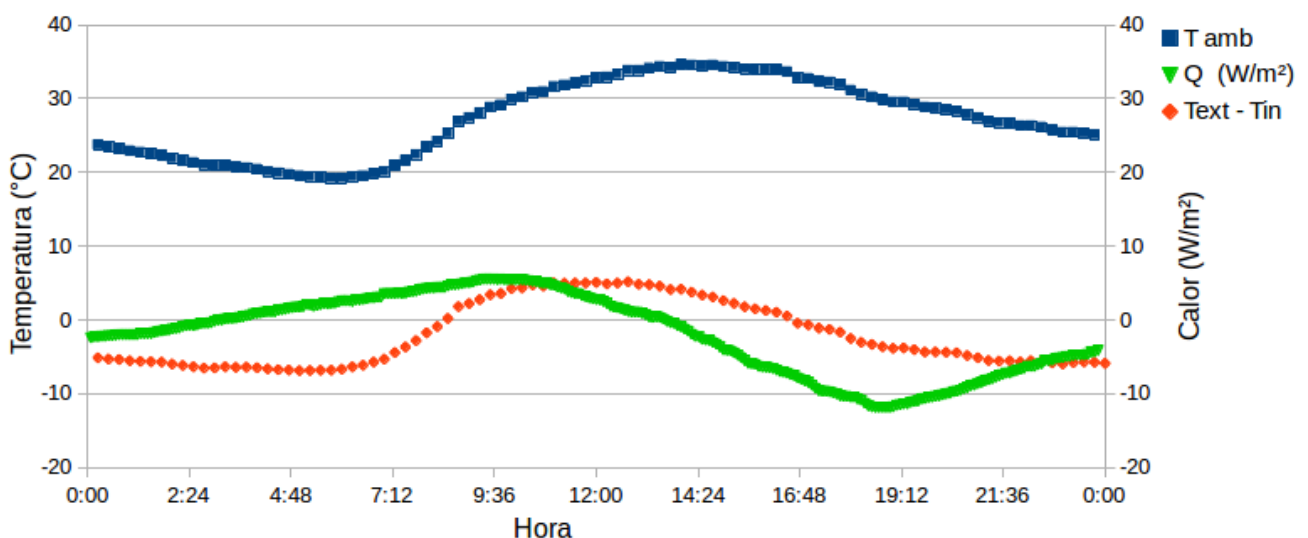


Figura 3: Datos medidos in-situ para un día completo dentro del período de toma de datos.

En la Figura 3 se observan, a modo de ejemplo, los datos medidos en el sitio experimental durante un día completo dentro del período de 52 días de adquisición de datos. La curva de color azul (T_{amb}) representa la temperatura ambiente [$^{\circ}\text{C}$]; la curva de color rojo ($T_{\text{ext}} - T_{\text{in}}$) es la diferencia entre la temperatura de la pared medida en la superficie externa y la temperatura de la pared en la superficie interna; y la curva verde (Q) representa el flujo de calor que atraviesa un elemento de pared en unidades de [W/m^2].

Como se observa de los datos experimentales el flujo de calor medido resulta bastante pequeño, con un valor máximo en todo el período de medición de $8,4 \text{ W/m}^2$. Esto se debe a la época del año de toma de datos (verano) y al hecho de que la pequeña construcción no tiene refrigeración interna, por lo que las diferencias de temperaturas entre el interior y el exterior no superan en ningún momento de la experiencia los 13°C . Estas condiciones limitan la aplicabilidad y la convergencia de los métodos, hecho que motivó el largo período de toma de datos.

Con estos datos se aplicaron los tres métodos de determinación de R antes mencionados. Los resultados obtenidos de cada uno de ellos se muestran a continuación:

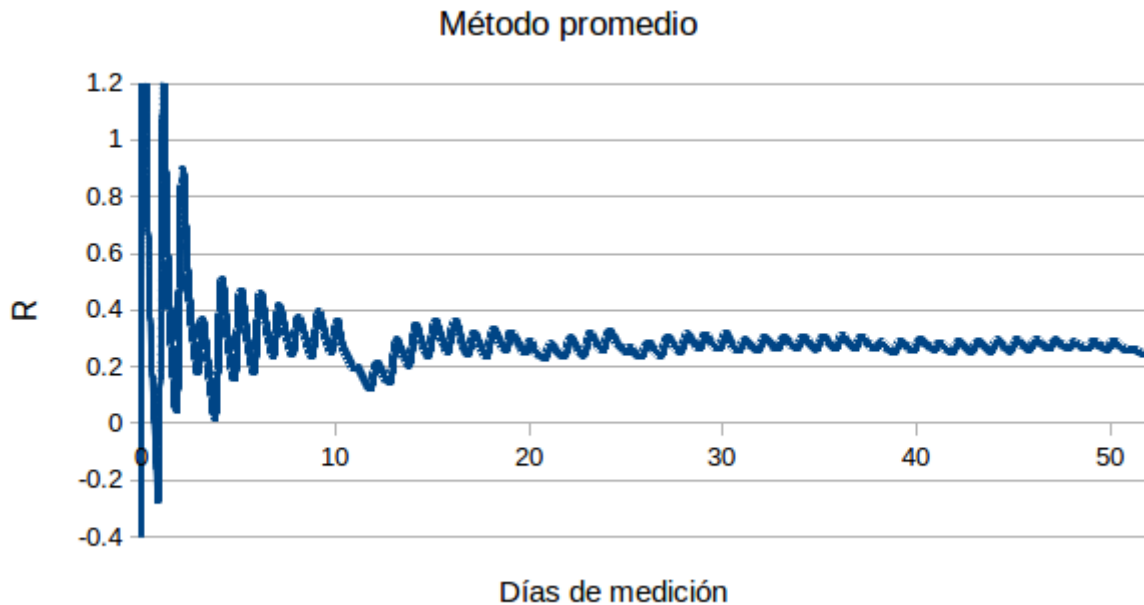


Figura 4: Resultados del cálculo de R con el método promedio para distintas cantidades de días de medición.

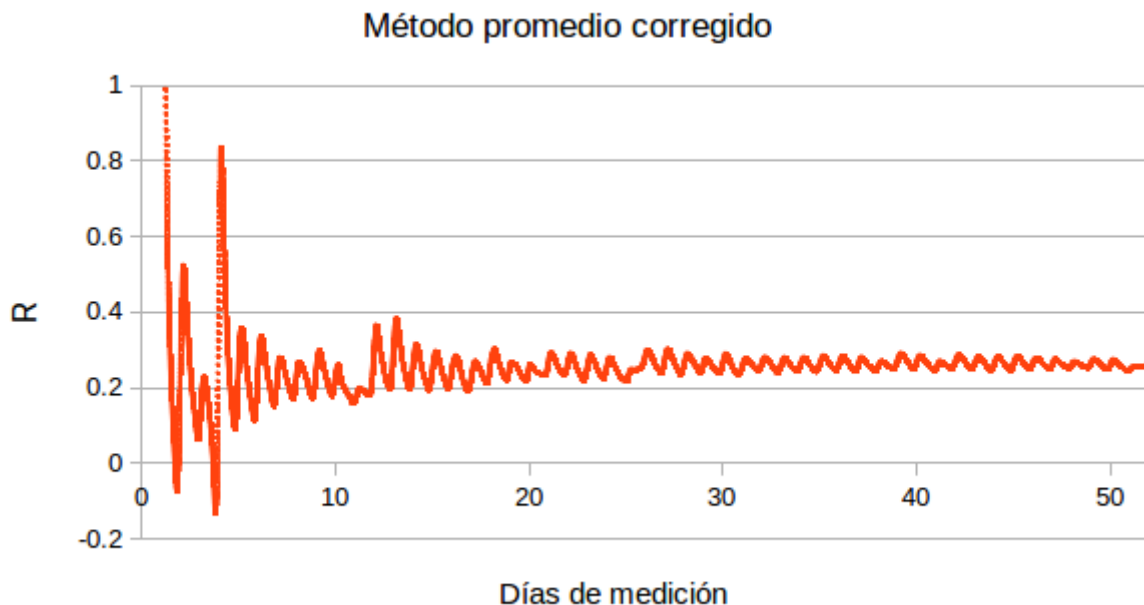


Figura 5: Valores calculados de R mediante el método promedio con correcciones por masa térmica, para distintas cantidades de días de medición.

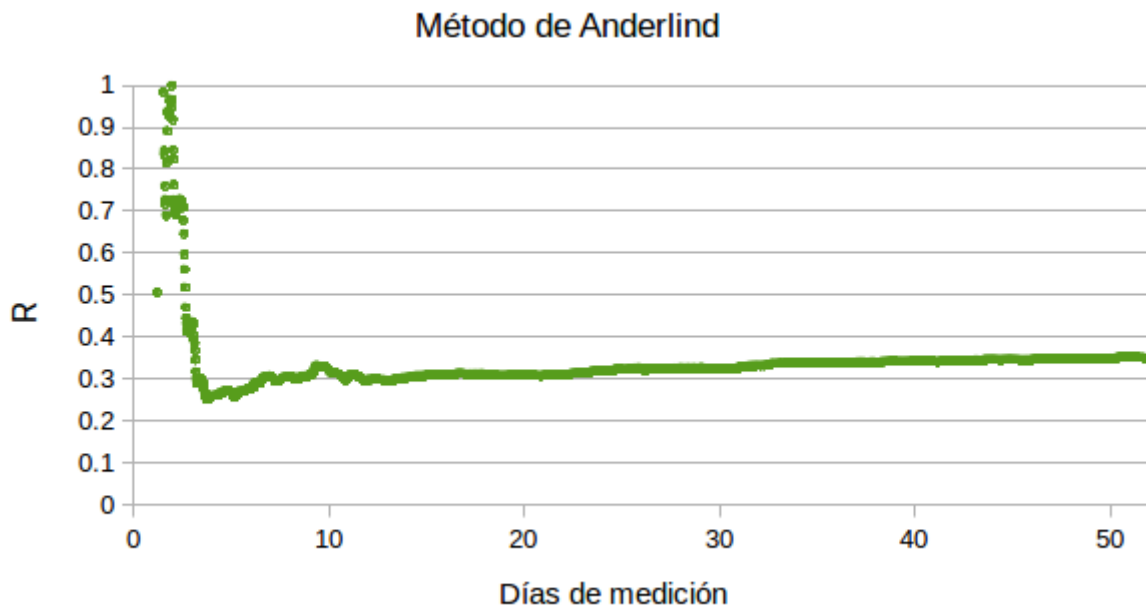


Figura 6: Resultados obtenidos para R con el método de Anderlind, para distintas cantidades de días de medición.

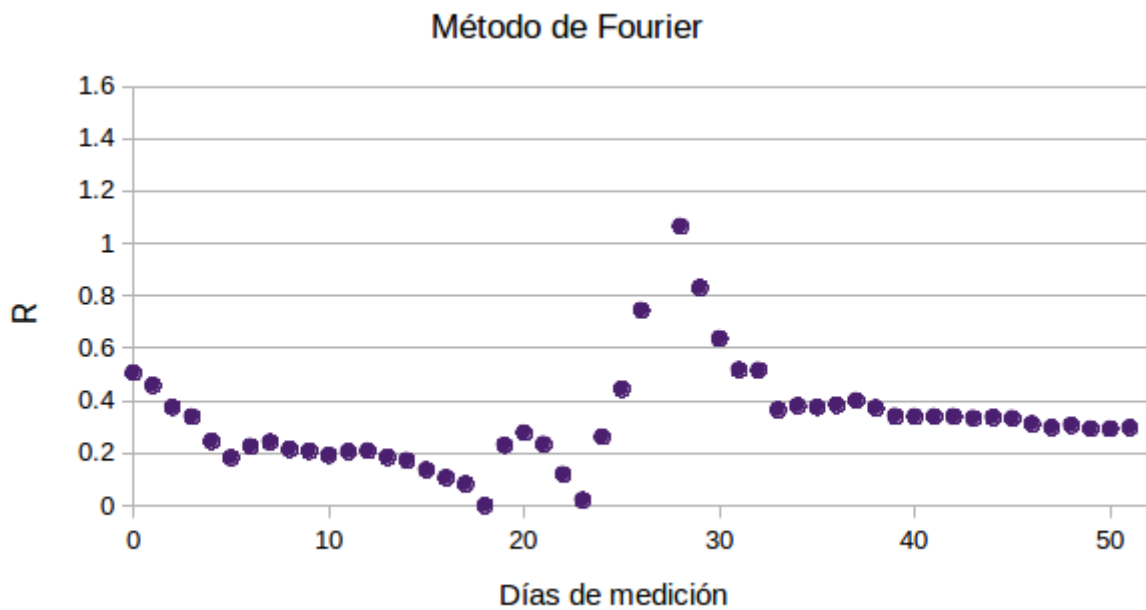


Figura 7: Resultados del cálculo de R con el método de Fourier con análogo eléctrico, para distintas cantidades de días de medición.

Se puede apreciar en las Figuras 4, 5, 6 y 7 que todos los métodos implementados han convergido a valores parecidos de R, en distintos tiempos de medición. Para analizar esta convergencia tomamos los valores promedio de R en los últimos 5 días y analizamos las desviaciones estándar asociadas a los valores calculados respecto de este promedio.

En la Figura 8 se presentan las desviaciones estándar de los distintos métodos con respecto a la cantidad de días de medición.

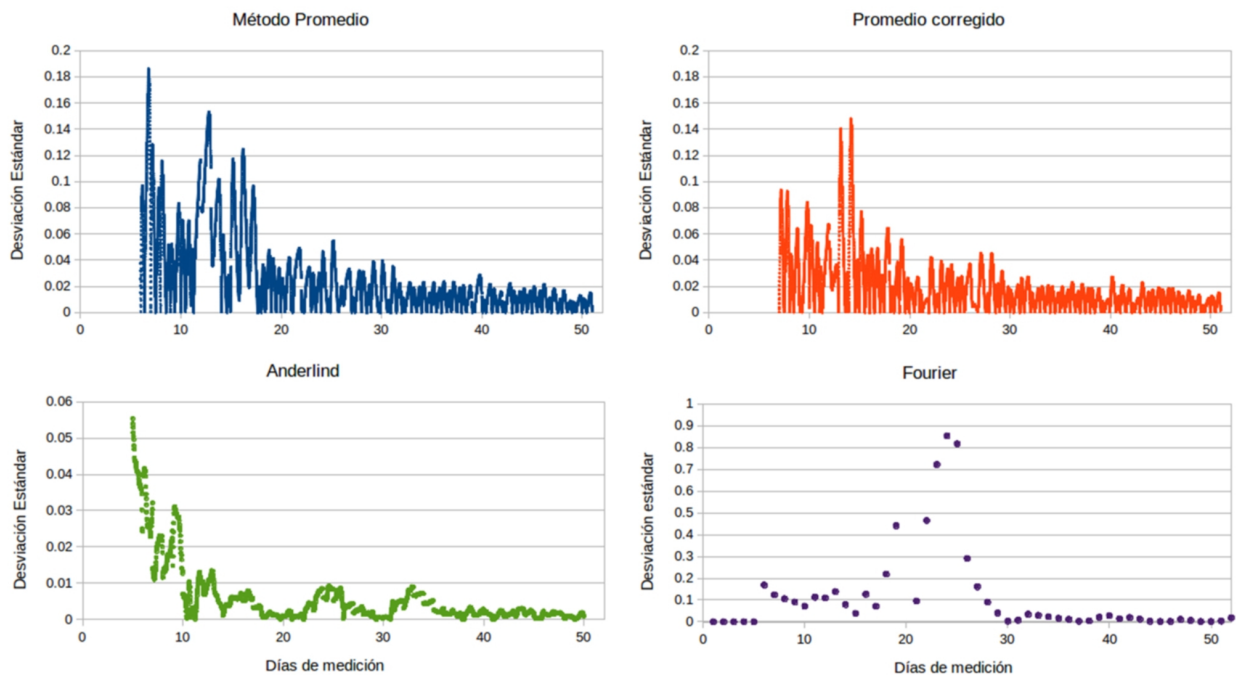


Figura 8: Desviaciones estándar de los distintos métodos según la cantidad de días involucrados.

Con un criterio de convergencia basado en que la desviación estándar no exceda el 10% del valor de R calculado para esos días se puede afirmar que: los métodos promedio y promedio con correcciones de masa térmica convergen después de los 30 días de mediciones, el método de Anderlind converge en 20 días y el método de Fourier lo hace también a partir de los 30 días.

Teniendo en cuenta los valores calculados con los últimos 5 días de mediciones, donde todos los métodos han convergido, se presentan los resultados finales en la Tabla 2:

Tabla 2: Resultados obtenidos para el final de los días de mediciones, todos en $[m^2K/W]$.

Método	R (promedio)	Mín	Máx	Desviación est
Promedio	0,268	0,242	0,290	0,008
Promedio correcc.	0,259	0,244	0,275	0,008
Anderlind	0,348	0,347	0,352	0,001
Fourier	0,299	0,283	0,307	0,006

Cabe notar que el método de Anderlind, a pesar de haber convergido con pocos días de datos, entrega resultados crecientes de R a medida que se aumenta la cantidad de datos involucrados. Si se observan los resultados obtenidos entre los días 15 y 22 con éste método, se obtiene un valor de R sensiblemente menor (0.3) con una desviación estándar promedio de 0.002. Estos valores parecen ajustarse mucho mejor a los obtenidos con los otros métodos.

Los métodos promedio (con y sin correcciones) muestran una convergencia a partir de los 30 días de mediciones, lo cuál resulta bastante extendido para una situación experimental. Sin embargo esto es considerado satisfactorio dado que la norma ISO 9869 establece que estos métodos tienden a fallar en condiciones de verano.

Por su parte el método de Fourier muestra una tendencia a converger hasta el día 15, luego del cuál sufrió una perturbación grande que requirió otros 15 días más para estabilizar los resultados. Esto se debe que entre esos días el clima local presentó considerables bajas en la temperatura y en la insolación dadas por una fuerte tormenta seguida de un frente frío de aire que alteró las condiciones climáticas que se venían dando.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo muestra una comparación de los distintos métodos de caracterización térmica para elementos de una construcción a partir de mediciones in-situ de temperaturas superficiales y flujo de calor a través de las paredes, en condiciones climatológicas de verano. A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que todos los métodos utilizados han convergido con un suficiente tiempo de mediciones, sin embargo existe una diferencia de hasta un 20% en los distintos valores de R obtenidos. Las condiciones estivales de medición resultan un gran inconveniente en la aplicabilidad y el tiempo de medición para los métodos, dados los bajos flujos de calor medidos y la poca diferencia entre las temperaturas.

Los métodos promedio (estacionario) y promedio con correcciones han convergido a partir de los 30 días de mediciones, algo esperable para este tipo de métodos que no tienen en cuenta el carácter dinámico que se evidencia principalmente en el verano (Deconinck, 2016). Sin embargo se ha demostrado que con un suficiente tiempo de toma de datos es posible obtener valores representativos de R con pequeñas desviaciones estándar, pero con una limitación que no mejora aún si se extiende la cantidad de datos.

El método dinámico de Fourier basado en la analogía térmico-eléctrica mostró una buena convergencia y una menor desviación estándar, sin embargo, se mostró muy susceptible a las condiciones meteorológicas. Por su naturaleza de analogía ondulatoria, una variación de los flujos de calor y temperaturas (por ejemplo producto de una tormenta estival o un frente frío) puede introducir perturbaciones que alargan sensiblemente el tiempo de convergencia como puede observarse en la Figura 7.

El método de Anderlind mostró una rápida convergencia hacia un valor representativo de la resistencia del elemento de muro con una desviación estándar muy pequeña. Se presentaron problemas al aumentar el caudal de datos involucrados en el cálculo, ya que el valor resultante presentó un leve crecimiento sostenido en el tiempo, alejándose de los valores estimados por los otros métodos.

Como proyección a futuro de este trabajo se realizarán medidas in-situ del mismo elemento de muro en la casilla experimental, en distintas épocas del año (otoño o primavera e invierno). Esto permitirá determinar R con distintas condiciones que reduzcan las diferencias entre los métodos, como así también validar la aplicabilidad de los métodos en las distintas estaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- IEA, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2011. Technology Roadmap. Energy-efficient Buildings: Heating and Cooling Equipment. OECD/IEA, Paris (F).
- IPEEC, 2015. "Delivering Energy Savings in Buildings". Disponible en: https://ipeec.org/upload/publication_related_language/pdf/1.pdf. Último acceso: 22/03/2017.
- CESARATTO, P.G.; DE CARLI, M. A measuring campaign of thermal conductance in situ and possible impacts on net energy demand in buildings. **Energy and Buildings** v.59, p. 29–36, 2013.
- BYRNE, A.; DAVIES, A.J; ROBINSON. Transient and quasi-steady thermal behaviour of a building envelope due to retrofitted cavity wall and ceiling insulation, **Energy and Buildings** v.61, p. 356–365, 2013.
- BIDDULPH, P.; GORI, V.; ELWELL, C.A.; SCOTT, C.; RYE, C.; LOWE, R.; ORESZCZYN, T. Inferring the thermal resistance and effective thermal mass of a wall using frequent temperature and heat flux measurements. **Energy and Buildings** v.78, p. 10–16, 2014.
- ROELS, S.; BACHER, P.; BAUWENS, G.; JIMÉNEZ, M.J. Characterising the Actual Thermal Performance of Buildings: Current Results of Common Exercises Performed in the Framework of the IEA EBC Annex 58-Project. **Energy Procedia** v.78, p. 3282–3287, 2015.
- DECONINCK, A-H; ROELS, S. Comparison of characterisation methods determining the thermal resistance of building components from onsite measurements. **Energy and Buildings** v. 130, p. 309-320, 2016.
- ISO 9869-2014. Thermal Insulation – Building Elements – In Situ Measurement of Thermal Resistance and Thermal Transmittance, 2014.
- ANDERLIND, G. *Multiple Regression Analysis of in situ Thermal Measurements - Study of an Attic Insulated with 800 mm Loose Fill Insulation*, J. THERMAL INSUL. AND BLDG. ENVS, Volume 16, 1992.
- IRAM 11601, 2004. Aislamiento térmico de edificios – Métodos de Cálculo – Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario. Tercera edición, 2002.

<https://www.python.org/>

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por ANPCYT PICT-2014-2605 y por BAYLAT-CONICET 2014.