

Estudio teórico-práctico de una técnica de medición de la transmitancia térmica

mariano creus, maría florencia diacinti, diego emanuel paz

Facultad de Arquitectura y Urbanismo Universidad Nacional de La Plata
Argentina

1. Introducción

Los estudios de transferencia de calor permiten conocer la cantidad y la rapidez con que la energía térmica pasa hacia zonas de menores temperaturas. La física es de fundamental importancia en la etapa del diseño arquitectónico; las leyes básicas de la transferencia de calor son necesarias para la especificación del tipo y espesor del aislante a aplicar en muros, techos, caños de agua o ductos de aire acondicionado; también es parte del fundamento teórico del diseño de colectores solares, lozas radiantes, radiadores y de ventanas con aislación térmica.

Al evaluar la propagación del calor nos formulamos preguntas como cuál es el fenómeno físico predominante, cuáles son las leyes que permiten describirlo, qué variables son relevantes o cuál método de medición usar.

Un proceso físico puede estudiarse con métodos experimentales o teóricos. Los métodos experimentales tienen la ventaja de ser aplicados al sistema real o a una muestra del sistema, en condiciones controladas de laboratorio. En cualquier caso, el valor buscado se determina por medición y la precisión de la medida se evalúa con la incertidumbre en la medición. Por otro lado, los métodos teóricos son más rápidos, flexibles y económicos, pero en éstos la exactitud de los resultados depende de las hipótesis del modelo teórico y de las aproximaciones aplicadas en los cálculos. Es frecuente la utilización de un método teórico analítico para seleccionar la alternativa de diseño más conveniente y luego validarla con un método numérico o, de ser posible, con un método experimental. Varios métodos estandarizados de medición de resistencia térmicas de muros in situ han sido analizados en los últimos años (Cesaratto, P.G., De Carli, M. 2013), (Asdrubali, F. y col., 2014), (Ioannis A. Atsonios y col., 2017), (Bienvenido-Huertas y col., D.,2020).

2. Desarrollo

La transferencia de calor es un fenómeno que puede producirse de diferentes maneras, por conducción, convección, radiación o evaporación. La conducción de calor es el fenómeno de transmisión de calor propio de los medios sólidos.

La rapidez de la conducción de calor a través de un medio depende de su forma geométrica, su espesor, su material y la diferencia de temperatura a través de él. Cuando el calor se conduce en una dirección dada, la ley de Fourier (1855) establece que la rapidez de transferencia de energía térmica por conducción o flujo conducido es proporcional al área () de la superficie, perpendicular a la dirección del flujo, y al módulo del gradiente de temperatura en esa dirección (Yunus A. Çengel y Afshin J. Ghajar, 2011).

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad \text{Flujo de calor (W)} \quad (1)$$

El signo negativo indica que el flujo de calor que se establece en la dirección X tiene sentido contrario al del aumento de la temperatura.

El factor de proporcionalidad es la conductividad térmica del material

λ ($W/(m \cdot K)$) En los problemas térmicos en arquitectura, resulta ser una buena aproximación considerar que su valor no varía apreciablemente con la temperatura y, además, si el material es homogéneo entonces tampoco variará en diferentes lugares dentro de un mismo material.

Consideremos una placa con las siguientes características:

- placa de espesor , con sus caras planas y paralelas.
- caras con temperaturas uniformes y constantes.
- material homogéneo.
- Conductividad térmica fija para todo el material.

Para las condiciones anteriores, la densidad superficial del flujo de calor resulta ser:

$$\dot{q} = \lambda \frac{\Delta T_s}{L} \quad \text{Densidad del flujo de calor (W/m}^2\text{)} \quad (2)$$

con $\Delta T_s \equiv |T_{se} - T_{si}|$ es el valor absoluto de la diferencia de temperaturas de las caras
y $\dot{q} \equiv \frac{1}{A} \left| \frac{dQ}{dt} \right|$ es el valor absoluto del flujo de calor por unidad de área.

La densidad de flujo puede ser expresada en términos de la resistencia térmica de la placa $R \equiv L/\lambda$:

$$\dot{q} = \frac{\Delta T_s}{R} \quad \text{Densidad de flujo de calor (W/m}^2\text{)} \quad (3)$$

Alternativamente, la densidad de flujo puede calcularse como el cociente entre la diferencia de temperatura de ambiental $\Delta T_a = |T_{ae} - T_{ai}|$ y la resistencia térmica total $R_T \equiv R_{se} + L/\lambda + R_{si}$:

$$\dot{q} = \frac{\Delta T_a}{R_T} \quad \text{Densidad de flujo de calor (W/m}^2\text{)} \quad (4)$$

Las cantidades R_{se} y R_{si} se denominan resistencia térmica superficial externa e interna. Cada una de estas cantidades representa la capacidad conjunta de intercambio de calor por radiación y convección entre cada superficie y el medio circundante. Las resistencias superficiales varían con emisividad de la superficie (que caracteriza la capacidad de emitir radiación térmica), la velocidad de la capa de aire en contacto con la superficie, la temperatura de la superficie, la temperatura del aire del ambiente y de otras superficies próximas. Los valores típicos de las resistencias superficiales (R_{se} y R_{si}) a adoptar en la práctica están establecidos por la norma argentina IRAM 11601 (IRAM, 2004).

La transmitancia térmica se define como la inversa de la resistencia térmica total, $K_T = \frac{1}{R_T}$, entonces la densidad de flujo también puede ser expresada como:

La transmitancia térmica se define como la inversa de la resistencia térmica total $K_T = \frac{1}{R_T}$, entonces la densidad de flujo también puede ser expresada como:

$$\dot{q} = K_T \cdot \Delta T_a \quad \text{Densidad de flujo de calor (W/m}^2\text{)} \quad (5)$$

El resultado de una medición se expresa como el valor obtenido en la medición junto a su incertidumbre (o dispersión) y a su unidad de medida. A continuación, se describe el método desarrollado para evaluar la medida y la dispersión de la transmitancia térmica ($K_T \mp u(K_T)$) de placas homogéneas de caras planas y paralelas.

2.1 Determinación del valor de la transmitancia térmica [K_T]

El principio de medición se fundamenta en la Ley de Fourier de transferencia de calor por conducción en régimen estacionario.

Se adoptó un método indirecto de medición basado en el registro simultáneo y repetitivo de cuatro temperaturas diferentes, correspondientes a las caras opuestas de la placa y a los ambientes circundantes a ambos lados. Se utilizarán los símbolos T_{se} , T_{si} , T_{ae} y T_{ai} para representar a las temperaturas superficiales externa e interna y ambientales externa e interna, respectivamente. Los valores medidos de estas magnitudes son las entradas del modelo de medición. El valor del mensurando, la transmitancia térmica total, se calcula a partir de la función de medición .

$$K_T = f(T_{se}, T_{si}, T_{ae}, T_{ai})$$

En el punto anterior vimos que la densidad de flujo de calor podría ser calculada de modos diferentes dados por las ecuaciones (3) o (4). Igualando estas ecuaciones podemos hallar una expresión para la resistencia total en término de las cuatro temperaturas.

Para obtener una expresión compacta, hacemos el siguiente cambio de variable:

$$z = \frac{y}{x} = \frac{T_{ae} - T_{ai}}{T_{se} - T_{si}} \quad \text{Cambio de variable} \quad (6)$$

$$\text{con } \begin{cases} y = T_{ae} - T_{ai} \\ x = T_{se} - T_{si} \end{cases}$$

Notemos que para cualquier sentido de propagación del calor ($T_{ae} > T_{se} > T_{si} > T_{ai}$ o $T_{ae} < T_{se} < T_{si} < T_{ai}$), tenemos que $z > 1$.

Entonces, la resistencia térmica total puede ser expresada en términos de z :

$$R_T = (R_{se} + R_{si}) \frac{z}{z - 1} \quad \text{Resistencia térmica total (m}^2\text{K/W)} \quad (7)$$

Finalmente, la transmitancia térmica se evalúa como su inversa ($K_T = 1/R_T$):

$$K_T = \frac{1}{R_{se} + R_{si}} \left(1 - \frac{1}{z}\right) \quad \text{Transmitancia térmica total (W/m}^2\text{K)} \quad (8)$$

Ésta es la función de medición del modelo: $K_T = f(T_{se}, T_{si}, T_{ae}, T_{ai})$.

2.Cálculo de la incertidumbre de la transmitancia térmica $[u(K_T)]$

En el punto anterior se presentó la función de medición del modelo que permite determinar el valor de la transmitancia térmica total, ahora nos ocuparemos de la expresión para calcular su incertidumbre:

$$u(K_T) = \frac{1}{R_{se} + R_{si}} \frac{1}{z^2} u(z) \quad \text{Incertidumbre o dispersión de } K_T \quad (9)$$

A partir de la ecuación del cambio de variables (6) vemos que la incertidumbre de z , que indicaremos como $u(z)$, dependerá de las incertidumbres de las cuatro mediciones de temperatura. En condiciones estacionarias, cuando la resolución de un sensor es mayor que la variación de la magnitud que está midiendo, el error medio cuadrático (RMS) de la medida es nulo. En estos casos, la incertidumbre en la medida se puede estimar igual a la exactitud del sensor.

Una estimación para la incertidumbre estándar de z es la incertidumbre típica combinada $u_c(z)$ puede expresarse del siguiente modo (ISO, 2008):

$$u_c(z)^2 = \left(\frac{\partial z}{\partial x} u(x) \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y} u(y) \right)^2 + 2 \frac{\partial z}{\partial x} \frac{\partial z}{\partial y} u(x)u(y)r(x,y) \quad (10)$$

La correlación entre las variables x e y es positiva ($0 < r(x,y) \leq 1$). La mayor dispersión estadística $u_c(z)$ corresponde al caso en que $r(x,y) \cong 1$; entonces:

$$u_c(z) \leq \left| \frac{\partial z}{\partial x} \right| u(x) + \left| \frac{\partial z}{\partial y} \right| u(y) \quad (11)$$

$$u_c(z) \leq \left(\frac{u(x)}{|x|} + \frac{u(y)}{|y|} \right) |z| \quad (12)$$

Reemplazando (10) en la expresión (7) para $u(K_T)$ resulta:

$$u(K_T) \leq \frac{1}{R_{se} + R_{si}} \frac{|x|}{|y|} \left(\frac{u(x)}{|x|} + \frac{u(y)}{|y|} \right) \quad (13)$$

$$\text{con} \quad x = T_{se} + T_{si} \quad (14)$$

$$y = T_{ae} + T_{ai} \quad (15)$$

$$u(x) = u(T_{se}) + u(T_{si}) = 2 \delta T_s$$

$$u(y) = u(T_{ae}) + u(T_{ai}) = 2 \delta T_a$$

donde δT_a es la exactitud del sensor de temperatura ambiente
y δT_s es la exactitud del sensor de temperatura superficial.

Explícitamente en términos de las temperaturas, la cota superior de $u(K_T)$ es:

$$u(K_T) \leq \frac{2}{R_{se} + R_{si}} \left| \frac{T_{se} - T_{si}}{T_{ae} - T_{ai}} \right| \left[\frac{\delta T_a}{|T_{ae} - T_{ai}|} + \frac{\delta T_s}{|T_{se} - T_{si}|} \right] \quad (16)$$

3. Descripción de las partes del equipo

El equipo desarrollado consta de dos sondas de medición con sensores de temperatura de contacto y un sensor de temperatura y humedad ambiental DHT22, una caja con una placa electrónica de código abierto con conectores de señales y de alimentación, un cable de conexión a puerto USB, una fuente de alimentación y una planilla de Excel para procesar los datos, visualizarlos en forma sincrónica y guardarlos en la memoria de la computadora.

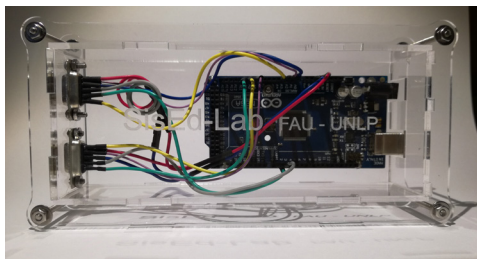


Figura 1. Fotografía de los componentes físicos del equipo: dos sondas, una placa electrónica con cables para conectar a una computadora y una fuente de alimentación. Figura 2. Caja de adquisición de datos con placa Arduino Mega 2560.

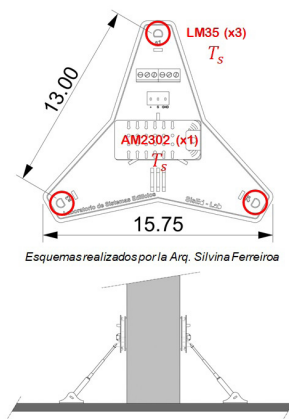
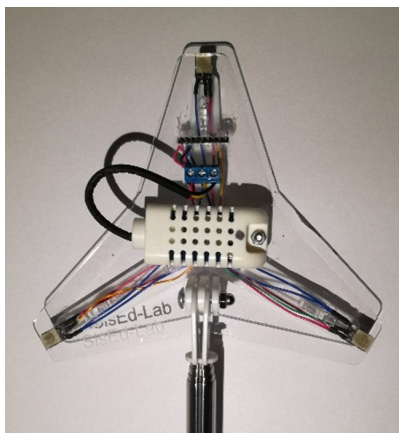


Figura 3. Sonda de medición de temperatura y humedad, con un sensor de temperatura ambiental y humedad relativa ambiente y tres sensores de superficie. La determinación de falsos contactos térmicos con la superficie se monitorea comparando los valores de temperatura de cada sensor. En los cálculos se utiliza el valor promedio de los tres sensores.

3. Resultados

3.1. Medición de las temperaturas

En esta sección se presentan los resultados de la primera prueba de funcionamiento del equipo realizada en condiciones controladas de laboratorio que simulan condiciones reales.

La medición de la temperatura de cada una de las superficies se efectuó con tres sensores analógicos LM35 (National Semiconductor, 1999). Estos sensores poseen una exactitud $\delta T_s = 0,5^\circ\text{C}$, a 25°C . La temperatura de cada uno de los ambientes se midió con un sensor electrónico digital AM2302 con una exactitud $\delta T_a = 0,3^\circ\text{C}$, entre -5°C y 65°C (Aosong Electronics, 2008). Este tipo de sensores permite registrar, además, la humedad relativa ambiente.

Todos los sensores fueron conectados a una placa Arduino Mega 2560 (Arduino, 2018) programada para leer diez veces la señal proveniente de cada uno. La salida del Arduino es enviada a una planilla Excel con el programa PLX-DAQ (Parallax, 2020) para la adquisición de los datos en una computadora a través del puerto serie (USB). Esta planilla de cálculo permite visualizar los datos en tiempo real con sus incertidumbres y almacenar toda la información para su posterior análisis estadístico.

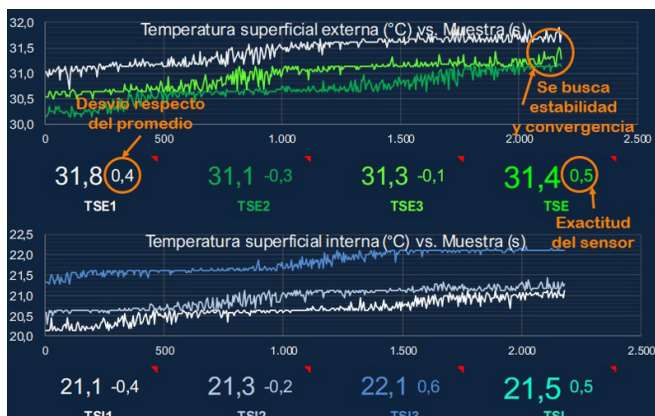


Figura 4. Monitor de datos: Visualización de temperaturas superficiales a tiempo real. Los valores numéricos del eje horizontal están expresados en segundos (s).

3.2. Medición de la transmitancia térmica

La evaluación de la transmitancia térmica se realizó con la expresión (8) y la cota superior para la incertidumbre de cada uno de los valores calculados se estimó utilizando la expresión (16).

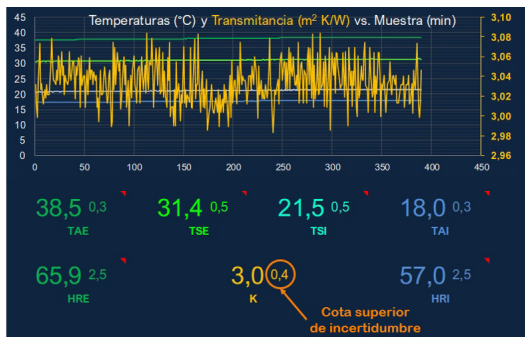


Figura 5. Visualización a tiempo real del valor de la transmitancia térmica total (KT), su incertidumbre (u(KT)), las temperaturas superficiales promedio (TSE y TSI) y las temperaturas ambientales promedio (TAE y TAI) con sus respectivas incertidumbres. También se presentan los valores de humedad relativa ambiente de cada sonda.



Figura 6. Monitor de datos: Visualización a tiempo real del valor de la transmitancia térmica total (K_t) en el intervalo de mayor estabilidad de los valores.

3.3. Estudio de la incertidumbre de la transmitancia térmica

Analicemos la expresión hallada para la incertidumbre de la transmitancia térmica:

$$u(K_T) \leq \frac{2}{R_{se} + R_{si}} \left| \frac{T_{se} - T_{si}}{T_{ae} - T_{ai}} \right| \left[\frac{\delta T_a}{|T_{ae} - T_{ai}|} + \frac{\delta T_s}{|T_{se} - T_{si}|} \right] \quad (16)$$

Comparemos el tamaño de los dos términos de la suma entre los corchetes. Si la resolución de los sensores de temperatura ambiente y de temperatura superficial son iguales ($\delta T_a = \delta T_s$) entonces el segundo término es el mayor porque en condiciones de medición siempre $|T_{ae} - T_{ai}| > |T_{se} - T_{si}|$. Entonces, mejorando la resolución del sensor de temperatura superficial se logrará una determinación con menor incertidumbre que si mejoramos la resolución del sensor de temperatura ambiental. Pero, ¿qué tan significativa es esta mejora? A continuación, se analiza cuantitativamente el efecto de la resolución de los sensores de temperatura superficial sobre la incertidumbre de la transmitancia térmica.

Consideraremos sensores con resoluciones de $0,1^\circ\text{C}$ y $0,5^\circ\text{C}$. En la Figura 7 se observa que para una diferencia de temperatura entre superficies de 10°C y una diferencia entre ambientes de 20°C , la incertidumbre menor en el valor de K_T se obtendrá con el sensor de mejor resolución ($0,1^\circ\text{C}$), representado un -63% de la correspondiente al otro sensor.

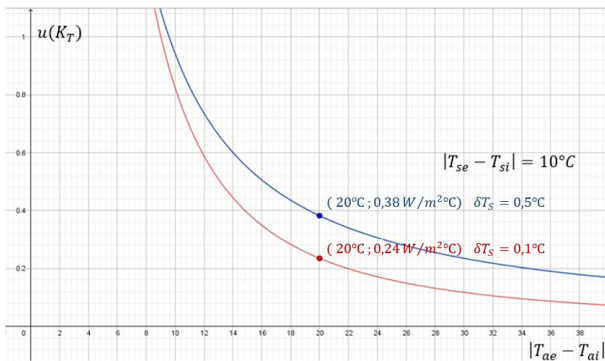


Figura 7. Variación de $u(K_T)$ con la diferencia de temperaturas ambientales. Se muestra el efecto de la exactitud de los sensores de temperatura superficiales para dos resoluciones de sensores.

¿Cuál será el efecto de la diferencia de temperatura superficial sobre la incertidumbre de la transmitancia térmica $u(K_T)$?

Consideremos sensores de temperatura superficial y ambiental de igual resolución, por ejemplo $0,5^\circ\text{C}$. En la Figura 8 se muestran tres curvas correspondientes a la incertidumbre de la transmitancia térmica para varias diferencias de temperatura ambiental: 5°C , 10°C y 15°C . Se puede notar que la incertidumbre se reduce cuanto menor sea la diferencia de temperatura ambiental. Este resultado permite entender la mínima diferencia de temperatura ambiental que requieren los equipos de medición comerciales para su funcionamiento. Las fichas técnicas de equipos de medición comerciales establecen diferencias de temperatura ambiental no inferiores a 15°C para su funcionamiento (Testo Australia, 2014), (Instrumentos Testo S.A, 2019), (greenTEG, 2019).

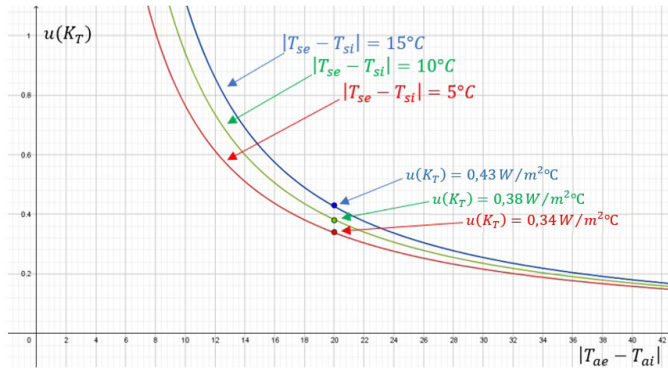


Figura 8. Variación de $u(K_T)$ con la diferencia de temperaturas ambientales. Se muestra el efecto de la diferencia de temperaturas superficiales. Casos considerados: 5°C , 10°C y 15°C .

De los tres casos mostrados en la figura, el más desfavorable corresponde a una diferencia de temperatura superficial de 15°C . En estas condiciones, la incertidumbre en la determinación de la transmitancia es inferior a $\sim 0,43 \text{ W/m}^2\text{C}$. La situación más favorable de medición se presenta cuando la diferencia de temperatura superficial es menor y la ambiental mayor. Para este caso, la incertidumbre en la determinación de la transmitancia es inferior a $\sim 0,34 \text{ W/m}^2\text{C}$. En todas las situaciones, la incertidumbre se reduce cuando menor sea la diferencia de temperatura entre los ambientes.

4. Conclusiones

El equipo desarrollado permite la determinación experimental del valor de la transmitancia térmica de muros in situ y de muestras de materiales en condiciones de laboratorio.

El equipo permite determinar valores de transmitancia con incertidumbres cercanas a $0,35 \text{ W/m}^2\text{°C}$ para diferencias de temperatura ambientales no inferiores a 20°C .

Su uso en cursos de posgrado y en actividades de investigación y extensión universitaria ayudará a la toma de decisiones para resolver problemas de deficiencia térmica en viviendas de bajos recursos.

Su bajo costo y fácil forma de replicarlo con componentes comerciales lo convierten en un instrumento pedagógico adecuado para el ámbito académico.

La etapa final del desarrollo del equipo involucra el proceso de calibración utilizando materiales comerciales con valores certificados de transmitancias térmicas.

Las metas finales del proyecto de investigación en curso son el diseño y desarrollo de una segunda versión del equipo con sondas inalámbricas.

5. Referencias

- Aosong Electronics Co., Ltd (2008). Digital-output relative humidity & temperature sensor/module. Recuperado de: <https://datasheetspdf.com/pdf/942482/ETC/AM2302/1>
- Arduino (2018). Mega 2560 Rev3. Recuperado de: <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3?selectedStore=us>
- Asdrubali, F., D'Alessandro, F., Baldinelli, G., Bianchi, F. (2014). Evaluating in situ thermal transmittance of green buildings masonries—A case study. *Case Studies in Construction Materials*, 1, 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2014.04.004>.
- Bienvenido-Huertas, D., Pérez-Ordóñez, J.L., Moyano, J., y Seara-Paz, S. (2020). Towards an in-situ evaluation methodology of thermal resistance of basement walls in buildings. *Energy and Buildings*, 208. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109643>.
- Cesaratto, P.G., De Carli, M. (2013). A measuring campaign of thermal conductance in situ and possible impacts on net energy demand in buildings. *Energy and Buildings*, 59, 29-36. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.036>.
- greenTEG (2019). gO Measurement-System. Wireless multi-channel measurement system for U-value, temperature, and humidity. Recuperado de: https://www.greenteg.com/template/userfiles/files/broschure_updated_January_2020.pdf
- Instrumentos Testo S.A (2019). Termohigrómetro Testo 635 con sonda de transmitancia térmica y sonda inalámbrica de temperatura ambiente. Recuperado de: <https://static-int.testo.com/media/17/39/ce2df-38ca14a/Catalogo-ES-testo635-DT-SP.pdf>
- Ioannis A. Atsonios, Ioannis D. Mandilaras, Dimos A. Kontogeorgos, Maria A. Founti. (2017). A comparative assessment of the standardized methods for the in-situ measurement of the thermal resistance of building walls. *Energy and Buildings*, 154, 198-206. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.064>.
- IRAM (2004). Norma IRAM 11601. Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario. <https://catalogo.iram.org.ar/#/normas/detalles/572>.
- ISO (2008). GUÍA ISO / IEC 98-3: 2008. Incertidumbre de la medición - Parte 3: Guía para la expresión de la incertidumbre en la medición (GUM: 1995). <https://www.iso.org/standard/50461.html>
- National Semiconductor (1999). LM35. Precision Centigrade Temperature Sensors. Recuperado de: <http://www.datasheet.es/PDF/49860/LM35-pdf.html>
- Parallax (2020). Parallax Data Acquisition (PLX-DAQ). Recuperado de: <https://www.parallax.com/package/plx-daq/>
- Testo Australia (2014). Assessing the “U value” Measurement with testo 635. Recuperado de: <https://youtu.be/VbK0sOfT318>
- Yunus A. Çengel y Afshin J. Ghajar, (2011). Transferencia de Calor y Masa. Fundamentos y aplicaciones. Cuarta edición. McGraw-Hill/Interamericana Editores. México.