

Configuración de operación y puesta en marcha de un sistema de medición de transmitancia térmica

Configuration of operation and start-up of a thermal transmittance measurement system

Resumen

En este trabajo, realizado en el marco del proyecto de investigación 11-U177 de la UNLP, presentamos la implementación práctica de un prototipo original de bajo costo de un sistema de medición de transmitancia térmica en condiciones de estado estacionario. Se presenta el modelo teórico de medición elaborado, se describen los componentes del sistema de medición construido y finalmente se indican los pasos a seguir en la instalación y el montaje para realizar la mediación de transmitancia térmica de un muro de una vivienda. Los resultados obtenidos se comparan con el valor calculado a partir del procedimiento de la Norma IRAM 11.601. Los resultados de los ensayos realizados indican que el sistema es capaz de medir transmitancias térmicas de muros para los casos en que las diferencias de temperatura entre los ambientes a ambos lados del muro sean estables y mayores a 8 °C.

Palabras clave: Desarrollo, Económico, Prototipo, Medida, Temperatura, Calor.

Abstract

In this work, carried out within the framework of the UNLP research project 11-U177, we present the practical implementation of an original low-cost prototype of a thermal transmittance measurement system under steady state conditions. The theoretical model of measurement elaborated is presented, the components of the built measurement system are described and finally the steps to follow in the installation and assembly are indicated to carry out the thermal transmittance mediation of a wall of a house. The results obtained are compared with the value calculated from the procedure of Standard IRAM 11.601. The results of the tests carried out indicate that the system is capable of measuring thermal transmittances of walls for cases in which the temperature differences between the rooms on both sides of the wall are stable and greater than 8 °C.

Keywords: Development, Economic, Prototype, Measurement, Temperature, Heat.

Creus, Mariano F.
mcreus@fau.unlp.edu.ar
Universidad Nacional de La Plata, Argentina

Paz, Diego A.
revistas@unne.edu.ar
Universidad Nacional de La Plata, Argentina

Recibido: 31/03/2023

Aceptado: 25/05/2023

Introducción

La física es una herramienta de gran importancia en la etapa del proyecto arquitectónico. Las leyes de transferencia de calor son fundamentales para establecer las características de los diferentes elementos constructivos, tales como techos, muros, aberturas, tuberías o conductos con el fin de garantizar el confort térmico interior con un mínimo consumo de energía.

En relación a lo anteriormente mencionado, en el marco del proyecto de investigación 11-U177 de la Universidad Nacional de La Plata, desarrollamos un prototipo original de un sistema de bajo costo para la medición de transmitancia térmica en condiciones de estado estacionario (Creus M. et al., 2021). En el citado trabajo se analizó teóricamente la dependencia de las medidas con las temperaturas del objeto a medir (condiciones de funcionamiento) y la resolución de los sensores. Además, se presentó un estudio teórico de la dependencia de la incertidumbre asociada a la medida con las condiciones de funcionamiento.

El presente trabajo trata sobre la etapa siguiente del proceso de desarrollo del sistema, ahora presentamos detalles del proceso de la puesta en marcha del sistema utilizando un muro de una vivienda como objeto de la medición, además las medidas obtenidas se comparan con el valor calculado para la transmitancia térmica según la norma IRAM 11.601 (IRAM, 2004).

Descripción del sistema de medición

El sistema de medición está formado por dos sondas iguales y un equipo de medición para el preprocesamiento de los datos (Figura 1).

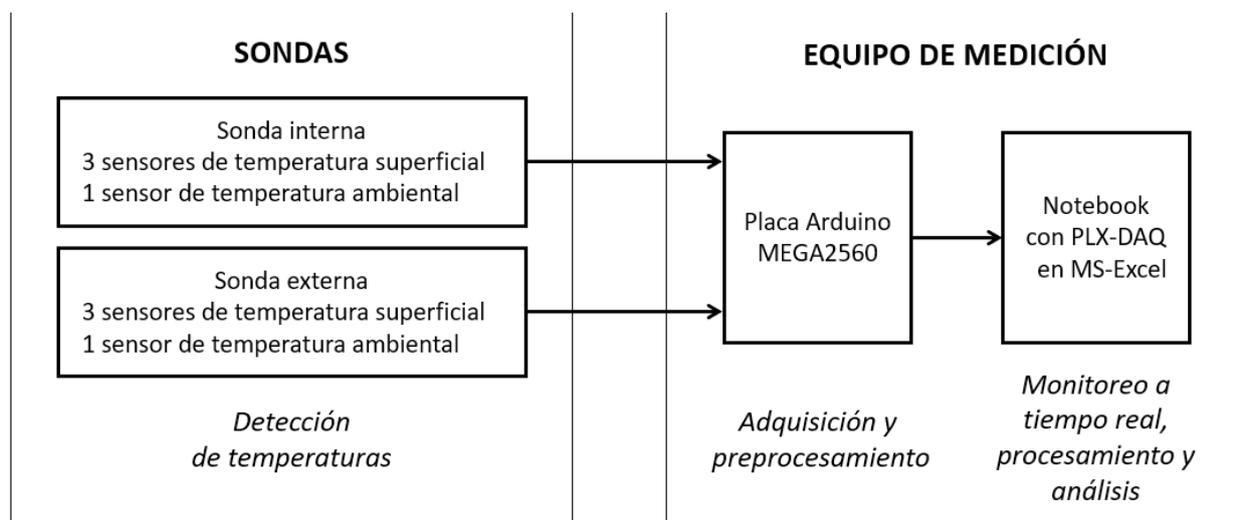


Figura 1. Componentes del sistema de medición.
(Elaboración propia)

Cada sonda es el soporte físico de tres sensores de temperatura superficial y un sensor de temperatura ambiente. Además, cada una posee un cable eléctrico de conexión al equipo de medición y un bastón extensible que permite posicionarla sobre la superficie a medir (Figura 2).

En el equipo de medición se realiza la conversión analógico-digital de las lecturas de los sensores que luego son transmitidas, junto a la información temporal de la adquisición, hacia una computadora donde se procesan los datos y se calcula el resultado de la medición. El equipo está formado por una placa electrónica Arduino MEGA 2560 (Arduino, 2018) con dos conectores para conectar ambas sondas, un conector de alimentación eléctrica y un cable con conexión al puerto USB para transmitir los datos hacia la computadora (Figura 2). La adquisición de datos en Excel® se realiza con el programa PLX-DAQ (Parallax, 2020). La visualización de los datos a tiempo real, el almacenamiento y el análisis de los datos registrados se realizan en la misma planilla de cálculo siguiendo la metodología adoptada para este sistema de medición.

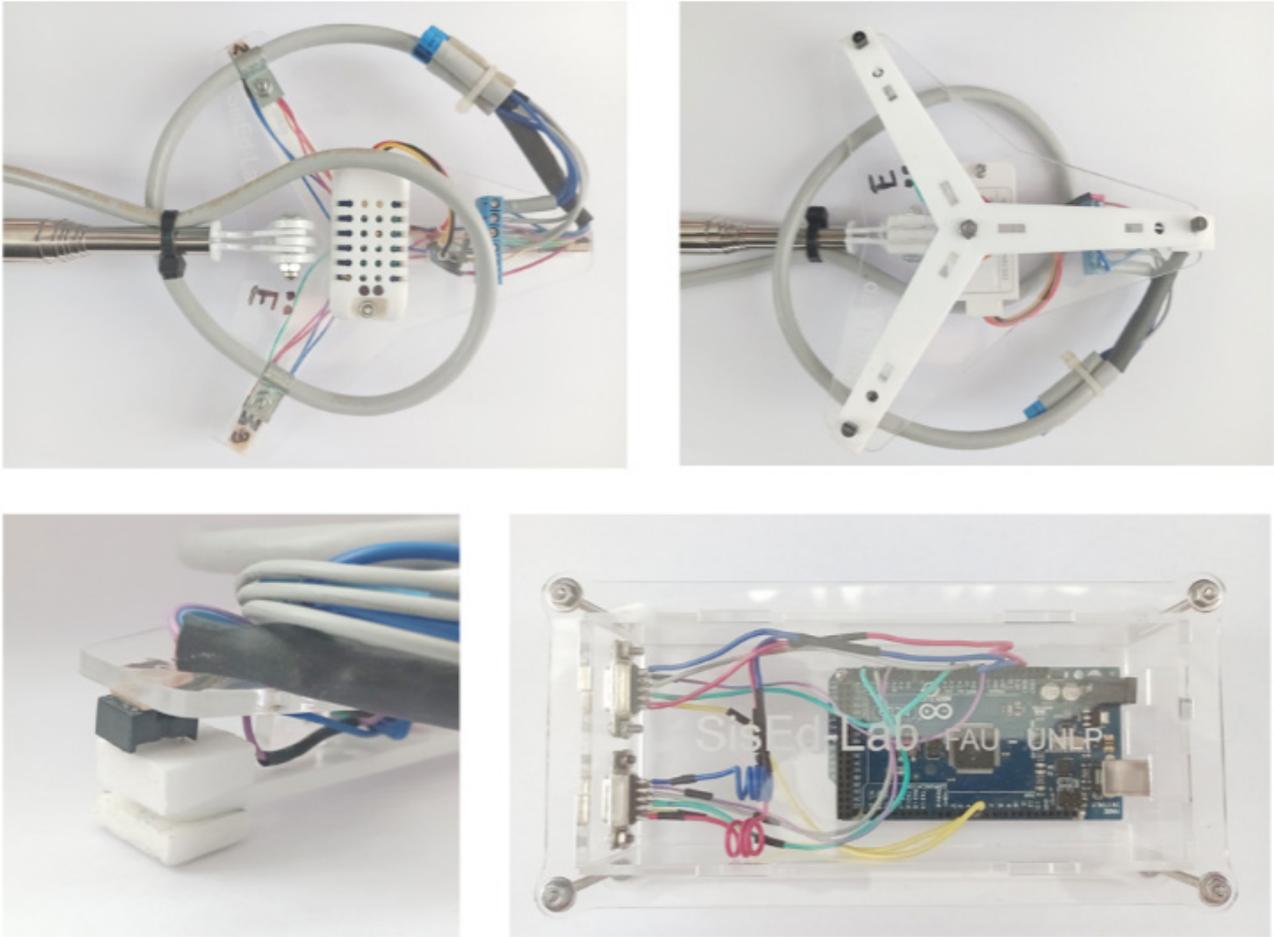


Figura 2. Componentes del sistema de medición de transmitancia térmica
Vistas superior e inferior de la sonda (fotos superiores). Detalle de la aislación sobre la superficie lateral de los sensores de contacto (foto inferior izquierda). Caja de adquisición de datos con placa Arduino Mega 256 (foto inferior derecha) (Elaboración propia)

Metodología

Principio, método y modelo de medición

El principio de medición se fundamenta en la ley de Fourier de transferencia de calor por conducción para régimen estacionario. El método de medición adoptado es un método indirecto basado en el registro periódico y simultáneo los valores de cuatro temperaturas, correspondientes a las caras opuestas de la placa a medir y a los ambientes de ambos lados.

El valor del mensurando (transmitancia térmica) se calcula a partir del siguiente modelo de medición (Creus, M., Diacinti, M.F.; Paz, D.A; 2022):

$$K = \frac{1}{R_{se} + R_{si}} \left(1 - \frac{T_{se} - T_{si}}{T_{ae} - T_{ai}} \right) \quad \begin{array}{l} \text{Transmitancia térmica total} \\ (W/m^2K) \end{array} \quad (1)$$

donde T_{se} y T_{si} son las temperaturas superficiales (externa e interna) y T_{ae} y T_{ai} son las temperaturas ambientales (externa e interna) calculadas a partir del promedio de temperaturas de los tres sensores de contacto. Estas cuatro temperaturas son las magnitudes de entrada del modelo de medición R_{se} y R_{si} son las resistencias superficiales del muro (IRAM, 2004).

Conforme a lo esperado, el valor que toma esta función de medición es independiente del sentido de propagación del calor. Otra característica de importancia práctica es que la expresión depende de la diferencia de las temperaturas superficiales ($\Delta\tau_s \equiv \tau_{se} - \tau_{si}$) y de la diferencia de las temperaturas ambientales ($\Delta\tau_a \equiv \tau_{ae} - \tau_{ai}$), pero es independiente de sus valores absolutos.

Instalación, montaje y configuración inicial

Cada una de las sondas del sistema se deben colocar con los sensores en contacto físico con las superficies de las caras opuestas del muro, ajustando convenientemente el largo de los bastones extensibles. Luego se deberá conectar a la caja de adquisición de datos, los cables de cada sonda y la alimentación eléctrica. Posteriormente se debe conectar el cable USB de la salida de la caja de adquisición de datos al puerto USB de una computadora.

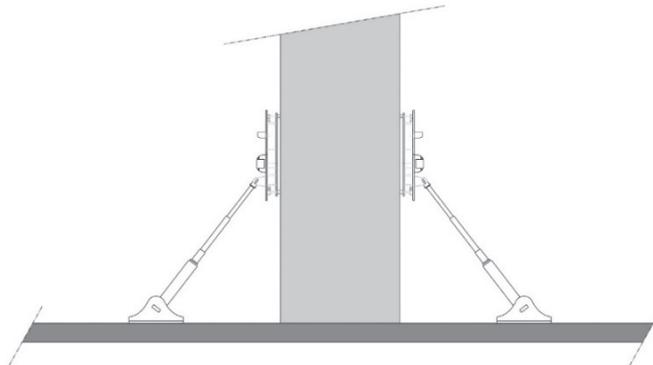


Figura 3. Instalación de las sondas sobre el muro a medir.
(Elaboración propia)

Una vez instalados los componentes del sistema, la configuración comienza con la ejecución del programa Arduino para cargar el proyecto creado en la placa. El proceso finaliza ejecutando la macro PLX-DAQ en Excel. De este modo el sistema está en condiciones de monitorear el proceso de adquisición.

La adquisición de datos debe ejecutarse durante varias horas para tener una población de datos suficiente para asegurar que se contará con datos confiables.

Criterio de la estabilidad térmica

El método utilizado requiere disponer de muestras de valores de temperatura medidos en condiciones estables (régimen estacionario). En las mediciones "in situ", asegurar el cumplimiento de esta condición durante varias horas es de difícil cumplimiento debido al ciclo diario de temperatura ambiente.

Por este motivo, fue necesario establecer un criterio de estabilidad térmica para la selección de las muestras de datos. Para asegurar que los datos seleccionados hayan sido tomados en condiciones aceptables de estabilidad térmica, en este trabajo se adoptó el siguiente criterio de estabilidad térmica: Las muestras de datos a utilizar para el cálculo de la medida deben presentar las siguientes características:

Tiempo de muestreo. Las muestras deberán contener los datos correspondientes a procesos de adquisición que tengan una duración mínima de 10 minutos.

(2)

Indicador de estabilidad. La suma de las desviaciones estándar muestrales de las temperaturas no debe ser inferior a $0,2^{\circ}\text{C}$.

Comentarios: Los sensores de temperatura superficial son sensores analógicos LM35 con exactitud (a 25°C) de $0,5^{\circ}\text{C}$ (National Semiconductor, 1999), los sensores de temperatura ambiental son sensores electrónicos digitales AM2302 con exactitud (entre -5°C y 65°C) igual a $0,3^{\circ}\text{C}$ (Aosong Electronics, 2008).

Los registros correspondientes a los primeros 30 minutos de la adquisición no deben ser tenidos en cuenta para el cálculo de la medida debido a que es necesario que los sensores alcancen las temperaturas de la superficie y del aire a ambos lados del muro.

Desarrollo

Características del muro

Se trata de un muro de una vivienda unifamiliar del barrio de Tolosa, La Plata. A continuación, en la Figura 4, se presenta el cálculo de la transmitancia térmica del muro y se describen las características geométricas y térmicas de las capas que lo componen.

CÁLCULO DE LA TRANSMITANCIA TÉRMICA						
SISEDlab	CASO: <i>Vivienda familiar.</i>					
	ELEMENTO: <i>Muro (escalera/patio cubierto)</i>					
	ESPESOR [m]: <i>0,210</i>					
	FLUJO DE CALOR: <i>Horizontal</i>					
Capas del elemento constructivo		L [m]	λ [W/m°C]	R_t [m ² °C/W]		
<i>Resistencia superficial exterior (Rse)</i>				0,04		
Capas	1	<i>Revoque ext. (cemento y arena, 1900 kg/m³)</i>		0,015	0,89	0,017
	2	<i>Ladrillo cerámico hueco, 18x18x25/33 cm, 9 agujeros, 125</i>		0,180	-	0,410
	3	<i>Revoque int. (cemento y arena, 1900 kg/m³)</i>		0,015	0,89	0,017
<i>Resistencia superficial interior (Rsi)</i>					0,13	
		$L_T =$	0,210	$R_T =$	0,62	
		Transmitancia térmica [W/m ² K] $K =$			1,62	

Figura 4. Cálculo de la transmitancia térmica según IRAM 11.601 (IRAM, 2004).
(Elaboración propia)

Mediciones de temperaturas

En días diferentes, se realizaron tres procesos de medición sobre un mismo muro. La instalación de las sondas sobre las superficies de la pared fue realizada en idénticas condiciones. Los procesos de adquisición de datos se realizaron con una frecuencia de 2/min. En todos los casos, las diferencias de temperaturas entre los ambientes a ambos lados del muro fueron superiores a 8 °C. La elección de las muestras de datos que fueron procesadas se realizó en base al criterio de estabilidad establecido anteriormente (2).

En la Figura 5 se presentan las evoluciones de las temperaturas superficiales y ambientales durante la adquisición durante los tres procesos de medición. En los gráficos se resaltan varios intervalos de adquisición de 10 minutos a partir de los cuales se seleccionaron las muestras de datos analizadas.

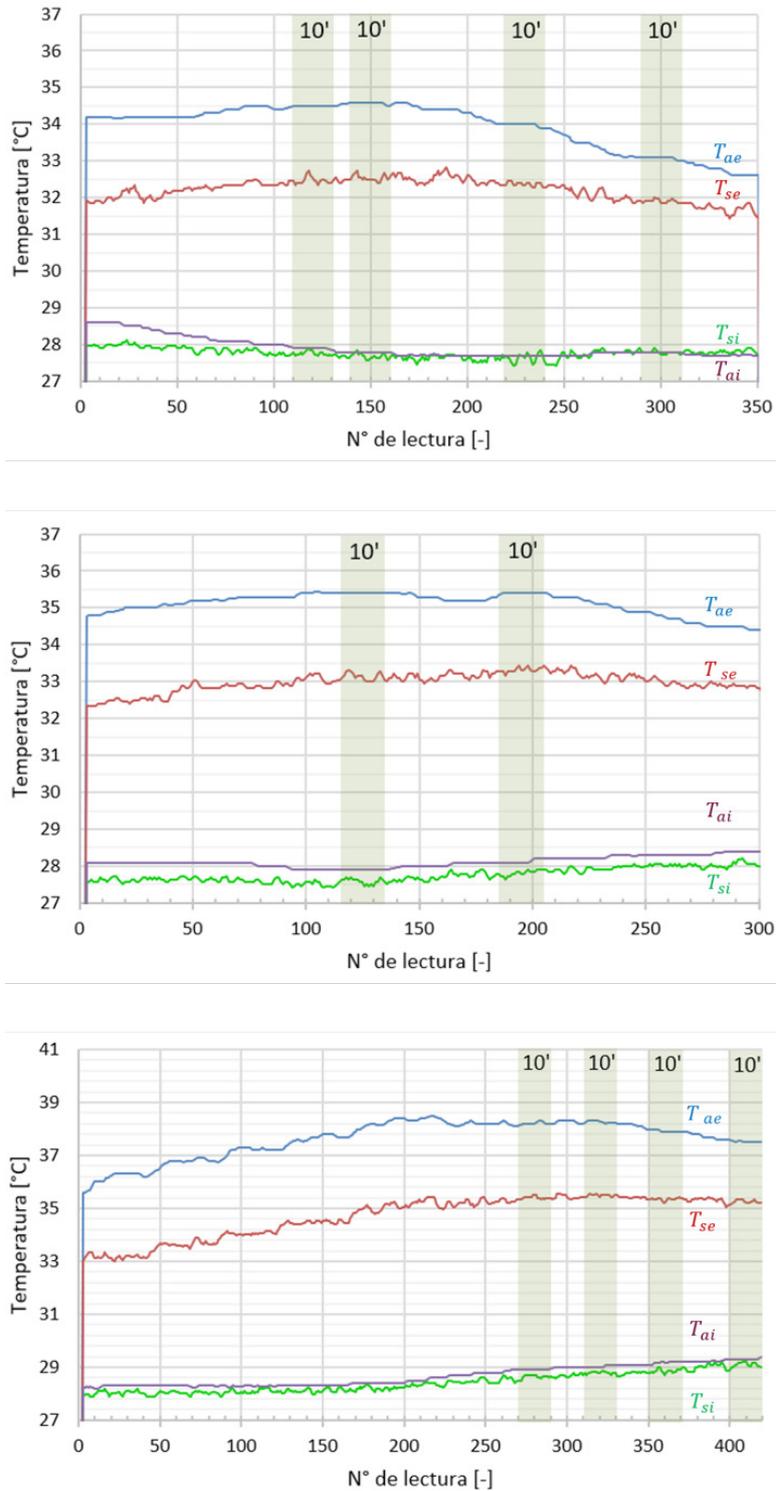


Figura 5. Evolución de las temperaturas durante la adquisición de datos: Medición N°1 (arriba), N°2 (centro) y N°3 (abajo). (Elaboración propia)

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En las siguientes tablas, se presentan las desviaciones estándar de las temperaturas correspondientes a muestras tomadas en diferentes mediciones. En letra negra, se han resaltado las muestras cuyo indicador de estabilidad no supera el máximo establecido (0,2°C).

Tabla 1

Muestra seleccionada de datos	Desviación estándar de temperatura muestral				Indicador de estabilidad muestral $\sum_j \sigma_{T_j}$	Transmitancia promedio muestral	
	$\sigma_{T_{ae}}$	$\sigma_{T_{se}}$	$\sigma_{T_{se}}$	$\sigma_{T_{ai}}$		\bar{K}	$\sigma_{\bar{K}}$
INI - FIN							
110 - 130	0,00	0,10	0,06	0,02	0,18	1,69	0,03
140 - 160	0,04	0,08	0,08	0,00	0,20	1,67	0,04
220 - 240	0,04	0,05	0,11	0,00	0,21	1,44	0,06
290 - 310	0,04	0,05	0,04	0,00	0,12	1,31	0,03

Indicadores de estabilidad de muestras en la medición N°1
(Elaboración propia)

Tabla 2

Muestra seleccionada de datos	Desviación estándar de temperatura muestral				Indicador de estabilidad muestral $\sum_j \sigma_{T_j}$	Transmitancia promedio muestral	
	$\sigma_{T_{ae}}$	$\sigma_{T_{se}}$	$\sigma_{T_{se}}$	$\sigma_{T_{ai}}$		\bar{K}	$\sigma_{\bar{K}}$
INI - FIN							
115 - 135	0,00	0,10	0,07	0,00	0,17	1,53	0,02
185 - 205	0,02	0,07	0,07	0,04	0,21	1,43	0,01

Indicadores de estabilidad de muestras en la medición N°2
(Elaboración propia)

Tabla 3

Muestra seleccionada de datos	Desviación estándar de temperatura muestral				Indicador de estabilidad muestral $\sum_j \sigma_{T_j}$	Transmitancia promedio muestral	
	$\sigma_{T_{ae}}$	$\sigma_{T_{se}}$	$\sigma_{T_{se}}$	$\sigma_{T_{ai}}$		\bar{K}	$\sigma_{\bar{K}}$
INI - FIN							
270 - 290	0,05	0,05	0,08	0,01	0,19	1,61	0,03
300 - 320	0,05	0,06	0,06	0,00	0,17	1,63	0,02
350 - 370	0,05	0,05	0,08	0,04	0,22	1,52	0,03
399 - 419	0,04	0,07	0,10	0,02	0,22	1,46	0,03

Indicadores de estabilidad de muestras en la medición N°3
(Elaboración propia)

En la Figura 6 se muestran los valores medidos de la transmitancia térmica en cada una de las muestras. Además, se indica el valor calculado de transmitancia según la Norma IRAM 11.601 (IRAM, 2004). Se puede notar que el conjunto de valores obtenidos en la medición N°1 poseen la dispersión máxima. En este proceso de medición se encuentra la medida con mayor desvío respecto del valor calculado. Por otro lado, el resto de los valores obtenidos a partir de muestras con indicador de estabilidad no superior a 0,2°C presentan desvíos inferiores a 0,1w (m²k).

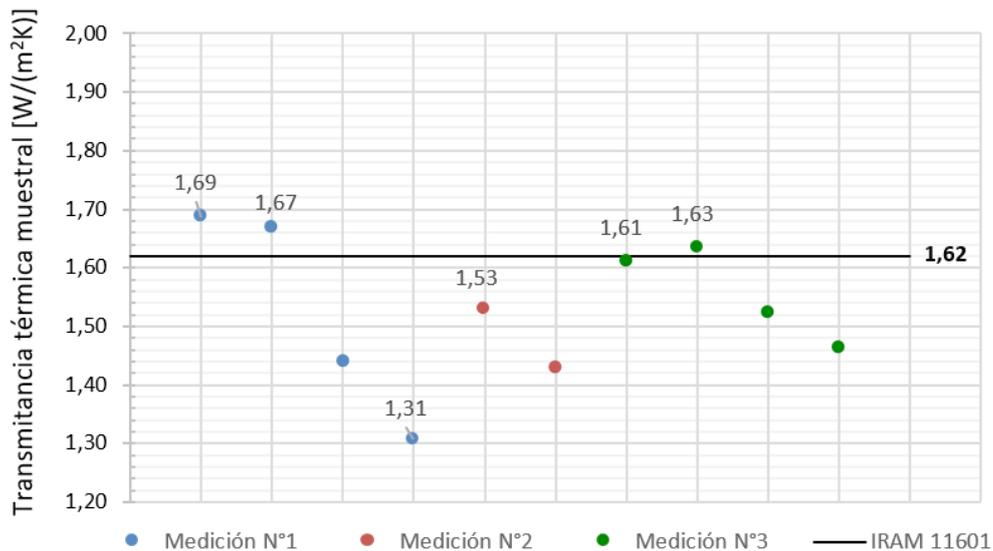


Figura 6. Valores medidos de transmitancia térmica muestral y valor teórico.
(Elaboración propia)

Finalmente, al promediar estos seis valores medidos a partir de las muestras de datos que cumplen con el criterio de estabilidad adoptado, resulta que el valor medio para la medida de la transmitancia del muro es $1,57 \text{ w}/(\text{m}^2\text{k})$. Esta medida tiene un desvío negativo respecto del valor calculado mediante la norma IRAM inferior a $0,05 \text{ w}/(\text{m}^2\text{k})$

Conclusiones

En presente trabajo es la primera prueba objetiva que permite asegurar y dar confianza de la capacidad del sistema para medir transmitancias térmicas de muros con buena exactitud.

Este sistema de medición, que ha sido desarrollado con fines educativos, es de muy bajo costo. El principal inconveniente de esta versión de desarrollo es que para realizar una medida in situ es necesario disponer de una abertura en el muro (ventana o puerta) por donde se pueda hacer el tendido del cable de la sonda externa que se ubicará del lado opuesto al del equipo y la computadora. La siguiente etapa del desarrollo consistirá en establecer una comunicación inalámbrica entre cada sonda y el equipo de medición.

Bibliografía

- Aosong Electronics Co., Ltd (2008). Digital-output relative humidity & temperature sensor/module. URL: <https://datasheetspdf.com/pdf/942482/ETC/AM2302/1>
- Arduino (2018). Mega 2560 Rev3. URL: <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3?selectedStore=us>
- Creus, M.F.; D'Arcángelo, J.M.; Diacinti, M.F.; Oliva, J.A.; Paz, D.E.; Ferreiroa, S. (2021). La validación de las herramientas de medición. SI + Herramientas y procedimientos. Instrumento y método. XXXIV Jornadas de investigación y XVI Encuentro regional FADU, UBA. Editor: FADU – UBA. URL: <https://publicacionescientificas.fadu.uba.ar/index.php/actas/article/view/1667>
- Creus, M.F.; Diacinti, M.F.; Paz, D.E. (2022). Estudio teórico-práctico de una técnica de medición de la transmitancia térmica. Primer Congreso de Innovación en Proyecto Arquitectónico (2021). Ponencias completas. 1ra. ed. (pp. 32-42). Red Iberoamericana de Innovación en Proyecto Arquitectónico (RIIPA). Editor: Remes Lenicov, Pablo. URL: https://issuu.com/taller7/docs/riipa_congreso_librocompleto
- IRAM (2004). Norma IRAM 11601. Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario. URL: <https://catalogo.iram.org.ar/#/normas/detalles/572>.
- National Semiconductor (1999). LM35. Precision Centigrade Temperature Sensors. URL: <http://www.datasheet.es/PDF/49860/LM35-pdf.html>
- Parallax (2020). Parallax Data Acquisition (PLX-DAQ Ver2). URL: <https://www.parallax.com/package/plx-daq/>