



Universitat
de les Illes Balears

TESIS DOCTORAL
2019

**INSTRUMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL
FLUJO TÉRMICO DE MATERIALES CON
APLICACIÓN AL AHORRO ENERGÉTICO EN
EDIFICACIÓN.**

Cristian Carmona Gómez



Universitat
de les Illes Balears

TESIS DOCTORAL
2019

Programa de Doctorado de Ingeniería Electrónica

**Instrumentación y caracterización del flujo
térmico de materiales con aplicación al ahorro
energético en edificación.**

Cristian Carmona Gómez

Director/a: Dr. Tomeu Alorda Ladaria

Director/a: Dr. Joan Muñoz Gomila

Doctor por la Universitat de les Illes Balears

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Resumen

La presente tesis se enmarca dentro de una línea de investigación multidisciplinar donde se establecen las necesidades de caracterización y modelización térmica presentes en el ámbito constructivo. La motivación principal para el desarrollo de nuevos equipos de instrumentación se centra en la mejora de agilidad tanto en la obtención de los resultados, disponiendo de medidas rápidas y a un coste más reducido que con opciones disponibles en la actualidad, como en la minimización de los requisitos impuestos para el análisis de materiales o elementos constructivos complejos, mejorando la información disponible en el campo.

Se desarrollan tres instrumentos de caracterización térmica capaces de establecer valores característicos de los distintos elementos constructivos que conforman una vivienda. Dichos instrumentos se diseñan en función de su ámbito de aplicación, desde elementos centrados en aspectos de diseño y caracterización de elementos constructivos complejos; caracterización térmica de viviendas o elementos ya construidos; información para usuarios finales sobre el control térmico como elemento de mejora del confort.

Instrumentos como un sistema de caja caliente que permite la obtención fiable de características de un elemento o material, utilización centrada en etapas de diseño o análisis de soluciones concretas. Un instrumento de caracterización de elementos constructivos existentes el cual de aplicación in-situ, lo que permite la obtención de valores representativos de vivienda existente, especialmente útil en el ámbito de la renovación/rehabilitación de viviendas. Así como un instrumento de información al usuario final, donde se determina el funcionamiento instantáneo de una vivienda y se informa a los usuarios de posibles actuaciones para la mejora del confort térmico enfocados a la utilización de sistemas de ventilación natural.

Mediante una publicación en revista se establece la correcta aplicabilidad de los instrumentos desarrollados, realizando todos los procesos de caracterización de una vivienda desde su etapa de diseño hasta la validación de los elementos construidos. Adicionalmente en otra de las publicaciones adjuntas, se demuestran las mejoras en ahorro energético, eficiencia de material y reutilización, cuando se utilizan los instrumentos desarrollados en comparación con los valores tipo de uso en la actualidad.

El objetivo principal que consigue la tesis es el avance hacia una caracterización de sistemas constructivos con un carácter dinámico, permitiendo conocer pasado, presente y futuro de las variables que determinan el comportamiento del mismo, lo cual conlleve tanto un mejor diseño de sistemas constructivos como una mejor respuesta ante necesidades de mejora en sistemas existentes.

Abstract

Thesis part of a multidisciplinary line of research where the thermal properties of materials and components in the construction field are established. The main motivation for the development of new instrumentation is improving agility both in obtaining the results, having quick measures and at a lower cost than with options currently available, as well as minimizing the analysis requirements of complex materials or construction elements, improving the information available in the field.

Three thermal characterization instruments are developed capable of establishing characteristic values of the different construction elements that make up a dwelling. These instruments are designed according to their scope, from elements focused on aspects of design and characterization of complex construction elements; thermal characterization of buildings or complex components; Information for end users on thermal control as an element of comfort improvement.

Instruments such as a hot box system that allows the reliable obtaining of characteristics of an element or material, focused on design stages or analysis of specific components. An instrument of characterization of existing construction elements with in-situ application, which allows obtaining representative values of existing housing, especially useful in the field of housing renovation / rehabilitation. As well as an instrument of information to the end user, where the instantaneous operation of a house is determined and the users are informed of possible actions for the improvement of thermal comfort focused on the use of natural ventilation systems.

Through a journal publication, the correct applicability of the developed instruments is established, performing all the characterization processes of a home from its design stage to the validation of the built elements. Additionally, in another paper, the improvements in energy saving, material efficiency and reuse are demonstrated, when the instruments developed are used in comparison with the current default used values.

The main objective that the thesis achieves is the progress towards a dynamic characterization of constructive systems, allowing to know past, present and future of the variables that determine its behavior, which entails both a better design of constructive systems and a better response to improvement needs in existing systems.

Resum

La present tesi s'emmarca dins d'una línia d'investigació multidisciplinar on s'estableixen les necessitats de caracterització i modelització tèrmica presents en l'àmbit constructiu. La motivació principal per al desenvolupament de nous equips d'instrumentació es centra en la millora d'agilitat tant en l'obtenció dels resultats, disposant de mesures ràpides a un cost més reduït que amb opcions disponibles en l'actualitat, com en la minimització dels requisits impostos per a l'anàlisi de materials o elements constructius complexos, millorant la informació disponible al camp.

Es desenvolupen tres instruments de caracterització tèrmica capaços d'establir valors característics dels diferents elements constructius que conformen un habitatge. Aquests instruments es dissenyen en funció del seu àmbit d'aplicació, des d'elements centrats en aspectes de disseny i caracterització d'elements constructius complexos; caracterització tèrmica d'habitatges o elements ja construïts; informació per a usuaris finals sobre el control tèrmic com a element de millora del confort.

Instruments com un sistema de caixa calenta que permet l'obtenció fiable de característiques d'un element o material, utilització centrada en etapes de disseny o anàlisi de solucions concretes. Un instrument de caracterització d'elements constructius existents amb aplicació in-situ, el que permet l'obtenció de valors representatius d'habitatge existent, especialment útil en l'àmbit de la renovació / rehabilitació d'habitatges. Així com un instrument d'informació a l'usuari final, on es determina el funcionament instantani d'un habitatge i s'informa els usuaris de possibles actuacions per a la millora del confort tèrmic enfocats a la utilització de sistemes de ventilació natural.

Mitjançant una publicació en revista s'estableix la correcta aplicabilitat dels instruments desenvolupats, realitzant tots els processos de caracterització d'un habitatge desde les etapes de disseny fins a la validació dels elements construïts. A més a en una altra de les publicacions adjuntes, es demostren les millores en estalvi energètic, eficiència de material i reutilització, quan s'utilitzen els instruments desenvolupats en comparació amb els valors tipus d'ús en l'actualitat.

L'objectiu principal que aconsegueix la tesi és l'avanç cap a una caracterització de sistemes constructius amb un caràcter dinàmic, permetent conèixer passat, present i futur de les variables que determinen el comportament del mateix, la qual cosa comporta tant un millor disseny de sistemes constructius com una millor resposta davant necessitats de millora en sistemes existents.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Listado de publicaciones derivadas de la tesis

Publicaciones en revista:

Carmona, Cristian & Horrach, Gabriel & Masdeu, F. & Muñoz, Joan. (2018). Comparative analysis of thermal characterisation methodologies of a historical double leaf masonry wall. *International Journal of Masonry Research and Innovation*. 3. 403. 10.1504/IJMRI.2018.095704.

Carmona, Cristian et al. Posidonia oceanica as thermal insulation: Determination of the minimum bulk density, according to project specifications, for its use as a building solution on a flat roof. *Revista de la Construcción* [online]. 2018, vol.17, n.2, pp.250-257. ISSN 0718-915X. <http://dx.doi.org/10.7764/rdlc.17.2.250>.

Participación en congresos:

Participativo - Ponencia oral (comunicación oral), Carmona, C.; Alorda, B; Muñoz, J; Masdeu, F; Horrach, G. "Overheating mitigation strategies analysis: a mediterranean case study" <http://ebooks.iospress.nl/volume/intelligentenvironments-2019-workshop-proceedings-of-the-15th-international-conference-on-intelligentenvironments-2>. The 15th International Conference on Intelligent Environments, Marruecos 2019

Participativo – Póster, C. Carmona; B. Alorda; J. Muñoz; G. Horrach., "Energy savings measurement combining cold and eco materials: a Mediterranean case study" EuroSun2016, España, 2016.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Tabla de contenido

| | |
|---|----|
| 1 – Motivación y objetivos | 11 |
| 1.1 Introducción | 11 |
| 1.2 Motivación y objetivos | 13 |
| 1.3 Metodología de trabajo | 15 |
| 1.4 Aplicación | 15 |
| 1.5 Estructura de la tesis | 16 |
| Referencias | 17 |
| 2 – Ahorro Energético en Edificación | 19 |
| 2.1 Necesidades energéticas en edificación | 19 |
| 2.2 Metodologías de caracterización | 20 |
| 2.2.1 Metodología de caracterización térmica mediante capas homogéneas | 21 |
| 2.2.2 Metodología de caracterización térmica mediante capas heterogéneas..... | 25 |
| 2.2.3 Metodología de caracterización térmica mediante caja caliente | 28 |
| 2.3 Instrumentación de caracterización térmica | 31 |
| 2.3.1 ISO 8990:1994 Determinación de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario. Métodos de la caja caliente guardada y calibrada. | 32 |
| 2.3.2 ISO 8302:1991 Determinación de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario. Métodos de la plancha caliente guardada. | 34 |
| 2.3.3 ISO 8301:1991 Determinación de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario. Métodos de aparato de medición de flujo térmico. | 36 |
| Referencias | 38 |
| 3 - Caja natural de plancha caliente | 41 |
| 3.1 Base de funcionamiento..... | 43 |
| 3.2 Requisitos de calibración..... | 44 |
| 3.3 Prevención de riesgos y limitaciones. | 47 |
| 3.4 Construcción del instrumento..... | 49 |
| 3.5 Presupuesto construcción y fungibles. | 51 |
| 3.6 Adaptación y Adquisición de datos | 55 |
| 3.6.1 Amplificación..... | 55 |
| 3.6.2 Adquisición..... | 58 |
| 3.6.3 Calibración y Validación. | 59 |
| 3.7 Resultados | 59 |
| 3.8 Uso y aplicación de la instrumentación desarrollada | 63 |

| | |
|---|-----|
| Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación. | |
| 3.8.1 Innovación material de aislamiento..... | 63 |
| 3.8.2 Proyecto Reusing Posidonia | 68 |
| Referencias..... | 75 |
| 4 - Metodología de caracterización térmica in-situ | 77 |
| 4.1 Base de funcionamiento..... | 79 |
| 4.2 Procesado de resultados. | 83 |
| 4.3 Calculo de errores. | 85 |
| Referencias..... | 88 |
| 5 – Breeze..... | 89 |
| 5.1 Introducción | 89 |
| 5.2 Base de funcionamiento..... | 91 |
| 5.3 Construcción del instrumento..... | 94 |
| 5.4 Modulo de información y sistemas de comunicación..... | 96 |
| Referencias..... | 98 |
| 6 – Factores adicionales de análisis | 101 |
| 6.1 Inercia VS Transmitancia Térmica | 101 |
| 6.2 Instrumentación medida inercia térmica..... | 104 |
| Referencias..... | 108 |
| Conclusiones | 109 |
| Referencias..... | 111 |
| Índice de ilustraciones:..... | 113 |
| Índice de tablas: | 115 |
| Anexos..... | 117 |
| Anexo 1 – Artículo: Comparative analysis of thermal characterization methodologies of a historical double leaf masonry wall | 117 |
| Anexo 2 – Artículo: Posidonia Oceanica as thermal insulation: Determination of the minimum bulk density, according to project specifications, for its use as a building solution on a flat roof. | 119 |
| Anexo 3 – Artículo: Instrumentación de caracterización térmica rápida de elementos y sistemas constructivos. | 121 |
| Anexo 4 – Instrucciones de montaje y uso BREEZE..... | 123 |
| Anexo 5 – Muestra datos caja natural de plancha caliente. | 125 |
| Anexo 6 – Informe de ensayo térmico mediante Caja Natural de Plancha Caliente. | 131 |

1 – Motivación y objetivos

1.1 Introducción

Las viviendas tienen como función principal proteger a sus usuarios del medio ambiente, efectos climáticos o agresiones externas. Dicha función ha ido evolucionando constantemente siguiendo factores sociales, climatológicos, ambientales, etc., progresando tanto en la forma como en el uso que se da a las viviendas.

El grado de protección higrotérmica que ofrece una vivienda se denomina confort térmico, y tiene un valor ideal cuando el ambiente interior a la misma es indiferente a los usuarios. Al no existir sensaciones favorables o desfavorables, el usuario puede concentrarse en su actividad. Mediante variables como ventilación, variabilidad térmica, iluminación o protección sonora es posible determinar el grado de confort térmico de una vivienda. Dichas variables vienen principalmente determinadas por tres factores fundamentales:

- Los materiales utilizados en la construcción, variando a lo largo de la historia en función de su disponibilidad, accesibilidad, abundancia o evolución de las técnicas de fabricación. Pasando de una construcción con elementos naturales de cercanía como es el barro y la madera, a materiales tratados y trabajados como piedra, mármoles o granitos, y en la actualidad materiales diseñados específicamente para la vivienda.
- Los sistemas constructivos, en función tanto de las técnicas constructivas como de las herramientas disponibles para el proceso constructivo. Variando desde un sistema tradicional y manual, donde tanto el transporte como la aplicación de los diferentes materiales se realiza manualmente, hasta sistemas mecanizados y automatizados, donde tanto la maquinaria de construcción como los procesos de aplicación han sido diseñados con la vivienda como objetivo.
- Los factores externos a la vivienda, tales como la climatología, la orientación o la cercanía a fuentes sonoras. Factores climáticos como la construcción en montaña o zonas de mar nos determina diferentes niveles de aislamiento térmico con el exterior, la orientación de la vivienda determina las zonas mejor iluminadas y más cálidas de la misma, y fuentes sonoras como son la cercanía a fábricas, puertos o zonas de tránsito determinarán la cantidad de huecos con el exterior que ofrece un mayor confort.

Aunque factores como ventilación o iluminación tienen un impacto significativo en el confort de la vivienda, la mejora constante tanto de los vidrios utilizados como de los sistemas de cierre de los mismos, permiten conseguir un nivel aceptable mediante el uso de instalaciones adicionales sin un coste energético sustancial (Sistemas de ventilación forzada, iluminación artificial, etc.).

Por otra parte, como se observa en la Tabla 1, el consumo energético de una vivienda para conseguir o mantener una temperatura interna confortable, supone hasta un 60% del total de la energía utilizada en la misma en el caso de una vivienda unifamiliar [1], siendo así este un factor predominante cuando se intenta mejorar la eficiencia energética en edificación.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

| Unidad: ktep | España | | Pisos | | Unifamiliares | |
|-------------------------|---------------|-------------|--------------|-------------|---------------|-------------|
| Calefacción | 6.892 | 47,0% | 2.529 | 32,2% | 4.349 | 63,9% |
| Agua caliente sanitaria | 2.776 | 18,9% | 2.038 | 26,0% | 729 | 10,7% |
| Cocina | 1.090 | 7,4% | 644 | 8,2% | 447 | 6,6% |
| Refrigeración | 123 | 0,8% | 79 | 1,0% | 44 | 0,7% |
| Iluminación | 606 | 4,1% | 413 | 5,3% | 193 | 2,8% |
| Electrodomésticos | 2.847 | 19,4% | 1.902 | 24,2% | 944 | 13,9% |
| Standby | 341 | 2,3% | 247 | 3,1% | 95 | 1,4% |
| TOTAL | 14.676 | 100% | 7.851 | 100% | 6.800 | 100% |

Tabla 1. Consumo energético medio de una vivienda por uso. Tabla obtenida de “Consumos del Sector Residencial en España Resumen de Información Básica” [1]

Una manera de mejorar el consumo energético destinado al confort térmico es mediante elementos de control térmico pasivo, como son los materiales y elementos de construcción cuyo objetivo sea la regulación térmica interior de una vivienda. El control térmico pasivo se conforma tanto por el conjunto de elementos y materiales utilizados en construcción que únicamente realizan una función de aislamiento, conglomerados de vegetación, áridos, coberturas vegetales exteriores; o adicionalmente realizan funciones estructurales, como en los casos de utilización de ramas o cañizo en cubiertas.

Durante la mayor parte de la historia conseguir un aislamiento adecuado consistía en la utilización de una cantidad sobredimensionada de los materiales de construcción, muros de mampostería de 1,5 a 2 m de ancho o utilización de múltiples capas de diferentes elementos constructivos, ejemplo claro es la ‘pared verda’ mediterránea donde se interponen capas de barro/árido con bloques de piedra caliza y enlucidos exteriores consiguiendo un grueso de muro de hasta 1m [2]. El sobredimensionamiento como metodología de conseguir un aislamiento adecuado a las necesidades climatológicas, tiene como desventajas la sobreutilización de material, y el coste energético de fabricación e implantación de dichos elementos constructivos.

La construcción de viviendas con un carácter horizontal, bloques de viviendas y grandes edificaciones, como medida de ahorro tanto en espacio de utilización como monetario, conlleva a su vez la necesidad de utilizar únicamente la cantidad de materia prima necesaria. Estas limitaciones aceleran sustancialmente el desarrollo tanto de nuevos materiales aislantes o materiales con funciones de aislamiento (Lanas animales, polímeros en forma de espuma), así como de nuevos elementos y metodologías constructivas que permitan minimizar la necesidad de uso de material aislante como medida de protección térmica (eliminación de puentes térmicos, utilización de cámaras ventiladas).

Un factor de impacto adicional en los materiales y sistemas constructivos utilizados son las normativas que desde los años 90 se han introducido para la cuantificación de las emisiones de gases que provocan efecto invernadero, fundamentalmente dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O) y gas metano (CH₄). Con el fin de reducir la emisión de dichos gases se establece el Protocolo de Kioto [3], por el cual España se compromete a reducir sustancialmente sus emisiones globales. Este acuerdo se refleja en múltiples documentos normativos de construcción, CTE HE [4], así como un sistema de certificación de edificios en función de su eficiencia energética compartido entre los estados miembros de la Unión Europea.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

La aplicación de un sistema de calificación de edificios tiene como función informar al usuario final de las viviendas del consumo y emisiones previsto para dicha construcción. La calificación energética se establece mediante una escala estandarizada, lo cual favorece la comparativa entre diferentes construcciones y fomenta la adquisición de viviendas más eficientes. Por otra parte, y contrario a la fundamentación de la normativa, la obligatoriedad de mostrar la etiqueta de certificación energética promueve la compra de edificación nueva y reduce el valor de edificaciones existentes o tradicionales, fomentando así un sector constructivo que en España supone entre el 15% y 20% de emisiones globales de gases nocivos [5].

Todos estos factores nos llevan a una premisa que muchos técnicos del sector se plantean ante la posibilidad de utilizar nuevos materiales de alta eficiencia o reutilizar/renovar sistemas existentes y de propiedades conocidas. Siendo la premisa planteada, si existe un balance positivo entre una **nueva construcción** más eficiente, con un coste ambiental mayor debido a la necesidad de producción de nuevos materiales y elementos constructivos con un alto nivel de CO₂ embebido [6], o **reutilización/renovación de edificación existente**, con un consumo energético mayor durante la vida útil del sistema.

1.2 Motivación y objetivos

La creciente concienciación de los usuarios en materia de contaminación, eficiencia energética y sostenibilidad ambiental hace que sectores como el de la construcción se vean profundamente transformados, llegando a modificar el modelo de proyección y diseño de edificios y viviendas por parte de los técnicos competentes.

La generación de un sistema de calificación energética de viviendas desarrollado por el ministerio favorece la mejoría en eficiencia energética de edificios tanto de nueva construcción como rehabilitaciones/renovaciones de vivienda existente.

Dichas certificaciones se basan principalmente en dos pilares de análisis:

- Las características térmicas de la vivienda, determinando la demanda energética de la misma y por lo tanto la energía que deberá utilizarse para cubrir las necesidades de los usuarios.
- Las propiedades de la instalación térmica, cubriendo como mínimo con las necesidades de la vivienda se analiza en este caso tanto la eficiencia de dichas instalaciones como la repercusión en CO₂ emitido de las mismas.

El análisis de las características térmicas de una vivienda se establece mediante la comparativa de la resistencia térmica (R) de distintos materiales primarios o elementos compuestos utilizados en construcción, siendo la resistencia térmica la capacidad de un material a oponerse a un flujo térmico. Aunque con cierta validez, el análisis de un sistema constructivo final en función de la resistencia térmica de los materiales primarios que lo componen puede inducir variaciones sustanciales del resultado de resistencia térmica total. Estas diferencias son debidas a factores diversos, como la interacción entre materiales, las modificaciones de las características térmicas del material al utilizarse como componente en mezclas de distintos compuestos o debido a modificaciones físicas de los mismos en su uso como elemento transformado [7].

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

La variabilidad de la resistencia térmica entre elementos constructivos similares ya se encuentra altamente categorizado por estudios como los presentados por E. Juodis [8], demostrando tanto variabilidad entre edificios con mismos componentes y sistemas constructivos, así como el impacto que dichas variaciones pueden conllevar en consumo energético final a los usuarios. Adicionalmente estudios contemporáneos como los presentados por F. Asdrubali [9] determinan la eficacia en la determinación de la resistencia térmica final de un elemento mediante el conocimiento de los materiales primarios que los componen, obteniendo variaciones de hasta el 43% entre valores esperados y valores reales medidos.

Por otra parte, la bioconstrucción se plantea como otro factor de incertidumbre en la evaluación energética. La utilización de materiales o bloques de aislamiento de origen natural tienen como inconveniente el desconocimiento de la respuesta térmica exacta de los mismos. En la actualidad, las normativas constructivas solventan este inconveniente mediante la utilización de valores medios aproximados, que aunque ofrecen una idea de las propiedades de los mismos, no determinan con exactitud la respuesta final del bloque de aislamiento [9].

Por todo lo anteriormente expuesto y con la finalidad de obtener resultados fiables al realizar una certificación energética, esta tesis tiene como **objetivo** el desarrollo de herramientas que permitan determinar la respuesta térmica de un bloque de aislamiento. Dichas herramientas permiten la obtención de resultados rápidos y fiables, tanto en bloques de aislamiento compuestos por materiales conocidos (elementos utilizados en nueva construcción) como en los que se utilizan materiales heterogéneos y con características altamente variables (materiales naturales o materiales reactivos).

Con el fin de lograr los objetivos planteados, se analiza y determina la variabilidad entre metodologías de caracterización térmica utilizadas por certificación energética de viviendas, y metodologías de caracterización más enfocadas a elementos finales y viviendas ya construidas. El análisis de los distintos métodos de medida, permiten establecer un criterio de análisis de los datos de certificación y la posibilidad de determinar rangos de validez de estos.

Por otra parte, y una vez se clasifican las metodologías de caracterización más eficaces, desarrollar sistemas de medida capaces de cubrir las necesidades específicas de la problemática planteada en construcción, tanto por parte de técnicos de certificación como por los técnicos de diseño de nuevas construcciones.

Adicionalmente, durante el desarrollo del trabajo se detecta que el uso por parte de los usuarios de la vivienda, aunque no reflejado en la obtención de certificados energéticos, tiene un importante impacto sobre el balance energético de la edificación [10]. Esto motiva la implantación de sistemas capaces de determinar, cuantificar y mejorar el uso por parte de usuarios de los diferentes sistemas constructivos, tanto en el uso que se hace de las instalaciones térmicas como en usos inadecuados de los sistemas de ventilación natural.

Finalmente, este trabajo pretende analizar el impacto de las metodologías y herramientas desarrolladas sobre un sistema constructivo real, participando para ello en diversos proyectos como entidad de caracterización térmica y soporte técnico en la determinación de materiales constructivos energéticamente eficientes, justos socialmente y medioambientalmente éticos.

1.3 Metodología de trabajo

El proceso de trabajo seguido en la presente tesis, tiene como finalidad la creación de un paquete de actuaciones que determinen fielmente el comportamiento térmico de una edificación, independientemente de su modelo constructivo o materiales utilizados. Para esto, es necesario la obtención de parámetros térmicos característicos desde etapas iniciales de diseño hasta su utilización final por parte de usuarios.

Inicialmente se establecen las distintas **metodologías de caracterización** utilizadas en la actualidad, como análisis del estado actual de la técnica y las opciones disponibles tanto en la cumplimentación de normativa como de carácter general. En esta fase se establecen las necesidades de las herramientas a desarrollar, así como

Seguidamente, se desarrollan tres herramientas capaces de obtener características térmicas, aunque tanto los resultados obtenidos como su aplicación son muy diferenciadas. Los instrumentos de caracterización desarrollados y sus características principales son los siguientes:

Caja natural de plancha caliente, instrumento de caracterización térmica para técnicos, utilizada para la obtención de valores de resistencia térmica con alta precisión. Su utilización es sencilla y su aplicación de carácter genérico, permitiendo el análisis de materiales y compuestos diversos.

Sistema transitorio 'In-situ', instrumento para la caracterización térmica de edificios, u otros sistemas constructivos, de los cuales no podamos o existan impedimentos a la obtención de muestras. Desarrollando una herramienta con dos usos fundamentales, la confirmación de la respuesta térmica prevista para el sistema y la determinación del rango de aislamiento en elementos compuestos por materiales desconocidos, con especial aplicación en la realización de valoraciones o certificaciones de edificios ya existentes.

Breeze, sistema de medición e información al usuario, mediante la predicción de variaciones térmicas en el interior de una vivienda. El dispositivo modeliza el ambiente en el que se encuentra e informa de las acciones ideales por parte del usuario con el fin de mitigar el impacto de dicha variación sobre el confort térmico.

Finalmente, se comprueban mediante **aplicación** todos los instrumentos y procesos desarrollados, analizando que los resultados obtenidos son coherentes, útiles y fiables. Este proceso se detalla en el siguiente apartado con el fin de profundizar en los resultados.

1.4 Aplicación

Tanto las herramientas desarrolladas, sistemas de instrumentación de caracterización térmica en estado estacionario y medidas transitorias 'in situ', como las metodologías de utilización de las mismas, así como la captura de datos de utilización por parte de usuarios finales, tiene como aplicación la mejora continua de la creación de sistemas constructivos eficientes, con bajo impacto ambiental y minimizando el coste de los mismos.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Para esto, se desarrollan sistemas capaces de obtener valores representativos y útiles dentro del sector de la construcción y sus normativas aplicables, aunque debido a la no conformidad con los requisitos de utilización en laboratorio (rangos de medición, franjas de errores máximos y tolerancias en la precisión) los valores que se obtienen no son certificables por normativas generales de aislamiento térmico.

Con el fin de determinar la idoneidad de las medidas obtenidas se realiza un análisis comparativo detallado de los instrumentos de medida desarrollados con otros sistemas de caracterización utilizados en el ámbito constructivo. Así como la aplicación de las diferentes metodologías en un caso real, proyecto rehusing posidonea detallado en el apartado 3.8.2, donde los sistemas desarrollados se utilizan desde etapas de diseño iniciales para la selección de posibles materiales naturales para su uso como elemento aislante. Utilizando la instrumentación “in-situ” para la validación de resultados de transmitancia térmica de los diferentes bloques de aislamiento una vez finalizados los procesos constructivos. Este análisis no únicamente intenta subsanar posibles deficiencias en edificaciones ya existentes, sino que permite educar a técnicos de futuros proyectos a desarrollar utilizando materiales o técnicas similares.

Como se expone en el apartado de motivación, otro apartado fundamental en el consumo energético y no reflejado en análisis de certificación energética, es el efecto térmico que tiene el uso correcto e incorrecto por parte de los usuarios. Sobre las viviendas diseñadas y construidas utilizando los instrumentos de caracterización desarrollados, y por lo tanto con conocimiento de la respuesta térmica de las mismas, se analizan diferentes aptitudes frente al consumo energético siguiendo los patrones de usuarios dispuestos por O. Guerra [10]. Se establecen medidas únicamente informativas para el usuario, que en el caso de su aplicación permiten tanto la mejora del confort térmico interior, como ahorro energético (no cuantificado) debido a la reducción de uso de las instalaciones de climatización.

Todos los pasos realizados se han centrado en dos requisitos fundamentales: las metodologías, herramientas y procesos desarrollados han de poder utilizarse por técnicos no formados en el ámbito de la instrumentación; tanto el coste de los sistemas como el coste de utilización de los mismos ha de ser muy reducido, de manera que se fomente una mejora continua de los técnicos sin la necesidad de un desembolso importante.

1.5 Estructura de la tesis

La presente tesis está compuesta por un total de seis capítulos en los cuales se expone la temática, situación actual y soluciones presentadas, así como un análisis del aplicativo de las mismas. Los capítulos de la tesis están compuestos de los siguientes contenidos:

Capítulo 2, estado actual tanto de la legislación aplicable en materia de caracterización térmica como los principios de funcionamiento de los instrumentos utilizados en la realización de dichas caracterizaciones. Análisis en detalle de las distintas metodologías de caracterización térmica determinando posibles problemas y ventajas entre las mismas.

Capítulo 3, desarrollo del instrumento de caja natural de plancha caliente, donde se detalla tanto su base de funcionamiento sus requisitos de diseño como un análisis de resultados obtenidos.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Capítulo 4, análisis del instrumento de aplicación in-situ, donde se caracterizan térmicamente sistemas constructivos ya edificados y reales.

Capítulo 5, diseño de un sistema de información a usuarios finales denominado Breeze, centrado en la mejora del confort térmico de viviendas cuya ventilación es natural. Adicionalmente, se estudia su aplicación sobre un bloque de viviendas con ventilación natural cruzada y las variaciones en el diseño de un instrumento cuando sus especificaciones se marcan sobre una fabricación en serie.

Capítulo 6, estudio en detalle del debate entre aislamiento e inercia térmica como elemento de control térmico. Dicho análisis intenta exponer todos los parámetros que afectan a un sistema térmico en la vivienda y su funcionalidad, prestando atención a los méritos y desventajas de las diferentes filosofías de aislamiento. Así como la determinación de ambos parámetros mediante la utilización de la instrumentación desarrollada.

Finalmente, un apartado de conclusiones del trabajo realizado en la presente tesis, así como diferentes vías de investigación de los sistemas desarrollados y posibles mejoras del mismo.

Referencias

- [1] IDAE (2017); “Consumos del Sector Residencial en España Resumen de Información Básica”. Disponible en: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Documentacion_Basica_Residencia_l_Unido_c93da537.pdf (Acceso: 16 Mayo 2017).
- [2] Julià, M. (2013); “Habitatges tradicionals: característiques arquitectòniques, tipològiques i constructives dels habitatges en sòl rústic a Mallorca”. Disponible en: <https://scholar.google.es/scholar?q=Ballester%2C+M.+%282013%29.+Habitatges+tradicionals+-+Característiques+arquitectòniques%2C+tipològiques+i+constructives+del+habitatges+en+sòl+rústic+a+Mallorca.+Edicions+Universitat+de+les+Illes+Balears.+&btnG=&hl=en&as> (Acceso: 16 Mayo 2017).
- [3] UNFCCC (1997); “Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change adopted at COP3 in Kyoto”, Japan, 11 December 1997.
- [4] CTE HE (2013); “Basic document HE energy saving, Documento básico HE ahorro de energía”. Disponible en: <http://www.codigotecnico.org/web/recursos/documentos/> (Acceso: 1 February 2021).
- [5] Mincotur (2017); “EMISIONES DE GASES EFECTO INVERNADERO POR ACTIVIDAD”. Disponible en: https://www.mincotur.gob.es/es-es/IndicadoresyEstadisticas/BoletinEstadistico/IV.%20Energ%C3%ADa%20y%20emisiones/IV_14.pdf (Acceso: 16 Mayo 2017).
- [6] G. P. Hammond, C. I. Jones (2008). “Embodied energy and carbon in construction materials”. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy 2008 161:2, 87-98

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

- [7] C. Carmona, G. Horrach, F. Masdeu, J. Muñoz (2018); “Comparative analysis of thermal characterisation methodologies of a historical double leaf masonry wall. International Journal of Masonry Research and Innovation”. 3.403.10.1504/IJMRI.2018.095704.
- [8] E. Juodis, E. Jaraminiene, E. Dudkiewicz (2009). “Inherent variability of heat consumption in residential buildings”, Energy and Buildings, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.06.007>.
- [9] F. Asdrubali, F. D’Alessandro, G. Baldinelli, F. Bianchi (2014). “Evaluating in situ thermal transmittance of green buildings masonries—A case study, Case Studies in Construction Materials”, ISSN 2214-5095, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2014.04.004>.
- [10] O. Guerra (2011). “Behavioural Patterns and User Profiles related to energy consumption for heating”, Energy and Buildings, 2011, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.024>.

2 – Ahorro Energético en Edificación

El consumo energético de una edificación está definido por dos vertientes fundamentales, por una parte la cantidad de energía necesaria para alcanzar un estado de confort por parte de los usuarios, demanda energética, y por otra el consumo en energía primaria, o emisiones contaminantes derivadas de dicho consumo, necesarias para cubrir la demanda energética, eficiencia de generación.

Siendo la demanda energética el foco de estudio del presente trabajo, donde se analizan y desarrollan herramientas en dos aspectos del mismo. La pérdida energética de los materiales constructivos del propio edificio, incrementando la resistencia térmica de dichos materiales se disminuye la cantidad de energía necesaria para mantener un estado térmico interior constante [1], y el uso de la propia vivienda por parte del usuario [2], en concreto analizando las necesidades de ventilación y el impacto del mismo sobre la demanda energética [3].

En este capítulo se introducen los requisitos y herramientas disponibles para la correcta determinación de la resistencia térmica de materiales constructivos y la posibilidad de mejora en la automatización de información hacia el usuario como medida limitadora del consumo energético relacionado con la ventilación por parte de usuarios.

2.1 Necesidades energéticas en edificación

En la actualidad, los requisitos térmicos de un bloque de aislamiento que una edificación debe cumplir vienen establecidas por normativas de construcción, entendiendo bloque de aislamiento como los elementos de protección térmica de una edificación, también conocidos como fachadas, cubiertas o medianeras. En el caso de España, la normativa que regula las características mínimas de protección térmica es el Código Técnico de la Edificación (CTE) Ley 38/1999 de 5 de noviembre, específicamente el Documento Básico de Ahorro Energético (DB-HE). Dicho documento básico establece un valor de resistencia térmica a cumplir por los distintos cerramientos de una edificación en función de la zona geográfica, orientación y uso.

Las mejoras energéticas en edificios, tanto de nueva construcción como en edificación existente, establecen el aislamiento de los sistemas constructivos en base al valor de transmitancia térmica certificado por los materiales utilizados. Estos valores de transmitancia, aunque altamente fiables son difícilmente aplicables en casos donde no se conocen dichos datos o las características de los materiales son altamente variables [4].

El uso de materiales naturales es un claro ejemplo de material donde podemos observar grandes variabilidades de resistencia térmica entre muestras [5]. Variaciones de la zona de recolección como humedad, material biológico o fase estacional hacen que materiales naturales como el sustrato vegetal tenga un carácter térmico especialmente heterogéneo, lo cual modifica sustancialmente el valor final de transmitancia térmica del elemento constructivo que lo incorpora.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

La variabilidad en resistencia térmica de elementos constructivos que incorporan materiales naturales se ve especialmente afectada cuando estos están compuestos por dos o más elementos naturales distintos [4]. Por ejemplo, los sistemas de fachada barro-paja donde aun manteniendo las proporciones de material pequeñas variaciones físicas del material utilizado, el secado de la paja o el compactado de la misma, conlleva importantes variaciones del valor final de transmitancia térmica.

Otro impedimento en la determinación de la resistencia térmica de bloques de aislamiento se presenta en el análisis de las características térmicas en edificaciones existentes. De especial importancia debido a la obligatoriedad de cumplir, en casos de reforma o rehabilitación, con el Documento Básico de Ahorro Energético (DB-HE). DB establecido en el Código Técnico de la Edificación (CTE) Ley 38/1999 de 5 de noviembre, en el que es necesario determinar un valor mínimo de aislamiento para los diferentes bloques de aislamiento del edificio objeto [6].

La necesidad de conocer la resistencia térmica de un bloque de aislamiento donde no se conoce directamente la respuesta del mismo o los materiales que lo componen, conlleva que proyectistas o constructores deben obtener muestras de los mismos y analizar en laboratorio la composición y características térmicas [7]. El proceso de caracterización térmica de un bloque de aislamiento en laboratorio tiene como principal inconveniente el alto coste tanto monetario como en tiempo de obtención de dichas certificaciones, por esto muchos técnicos del sector de la construcción utilizan valores aproximados o medios, los cuales se encuentran alejados del valor real de los sistemas constructivos utilizados y por lo tanto no se dispone de un conocimiento de la mejora energética de dicha actuación [5].

2.2 Metodologías de caracterización

Se denomina metodología de caracterización los procesos y requisitos necesarios para establecer con una precisión conocida los parámetros característicos de una muestra, ya sea un material simple o un sistema compuesto, dentro del ámbito térmico. Así pues, existen diferentes metodologías dependiendo principalmente de la utilización de las mismas, así como los requisitos a los que se expone el análisis térmico por parte de normativas, legislaciones o certificaciones [8].

Dentro del ámbito de la edificación, y específicamente en el apartado de diseño constructivo tiene especial importancia determinar las propiedades térmicas tanto de los materiales que se utilizan en la construcción, como de los sistemas constructivos compuestos desarrollados por los técnicos competentes.

Los sistemas constructivos a analizar no desarrollan funciones de aislamiento o protección térmica en exclusiva, operan en múltiples ámbitos como estructurales, de impermeabilización o atenuación sonora. Considerando que dichos sistemas están compuestos por diversas capas, donde cada una de las mismas realizan una o múltiples de las funciones desarrolladas por el sistema constructivo, por ejemplo, la protección térmica y sonora se realizada por el sistema constructivo al completo, pero funciones como la impermeabilización se realiza típicamente por una única capa del sistema constructivo.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Por esto, se define una sección del elemento constructivo a analizar, un ejemplo puede observarse en la Ilustración 1, y se denomina al mismo bloque de aislamiento. Dicho bloque de aislamiento estará compuesto por una o múltiples capas, las cuales no han de tener características de tamaño homogéneas en sección, permitiendo capas con diferentes tamaños a lo largo de la sección o incluso capas con geometrías complejas.

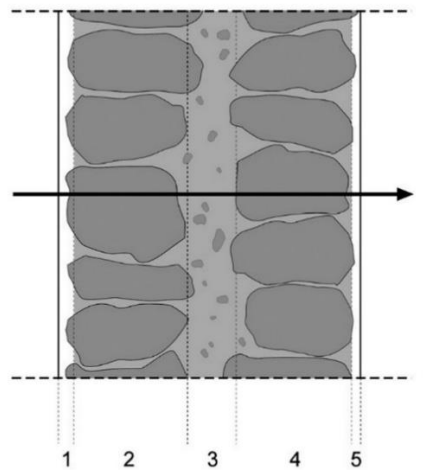


Ilustración 1. Ejemplo de las diferentes capas que componen un muro “pared verdadera”. 1) Mortero exterior de cal con espesor aprox. 0.02m, 2) Piedra caliza con espesor aprox. 0.25m, 3) Núcleo central de arcilla con espesor aprox. 0.10m, 4) Piedra caliza con espesor aprox. 0.25m, 5) Yeso de refinado con espesor aprox. 0.01m. Imagen propia.

Otra característica fundamental del análisis térmico y por lo tanto de las metodologías que nos permiten la caracterización de un bloque de aislamiento, es el régimen de funcionamiento al cual está sometida la muestra durante el periodo de análisis. Diferenciando profundamente el resultado final y su significancia entre metodologías de análisis en régimen estacionario y metodologías de análisis en régimen dinámico o funcionamiento real del bloque de aislamiento [9].

Aunque en la realidad un bloque de aislamiento raramente funciona en un régimen estacionario, donde el flujo térmico que atraviesa una sección del elemento constructivo es constante y no varía en el tiempo, debido tanto a las variaciones internas y externas al bloque de aislamiento como a la capacidad calorífica del mismo, mantener un valor de temperatura estable en el tiempo a lo largo de la sección del mismo. Aun así, los requisitos impuestos por normativas o legislaciones de construcción permiten trabajar con métodos simplificados obteniendo una idea aproximada del funcionamiento final del bloque de aislamiento.

2.2.1 Metodología de caracterización térmica mediante capas homogéneas

La metodología de caracterización que principalmente se plantea en normativas como el Código Técnico de la Edificación (CTE, 2006) y guías de diseño siguen un proceso de caracterización térmica no destructivo y especialmente simplificado, debido a que determina la transmitancia térmica de un bloque de aislamiento únicamente mediante la suma de transmitancia teóricas

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

de los componentes que la forman. En concreto, la metodología simplifica sustancialmente el análisis de características de los materiales dado el uso de transmitancia teórica de materiales completamente homogéneos, así como la interacción entre las diferentes capas de material que componen el mismo.

Como se discute en [5], el principal inconveniente de utilizar valores estandarizados para diversos materiales, especialmente en bloques de aislamiento en edificación, son las desviaciones en composición entre el material final y los componentes analizados para obtener el valor expuesto por el estándar, llegando a variaciones de hasta el 50%.

Otro factor de error importante en la aplicación de esta metodología proviene de la interacción entre materiales, la cual se presupone ideal. No solamente se descarta posibles malformaciones entre el contacto de materiales, sino que no considera posibles asimilaciones de diferentes capas (posible absorción de capas blandas por capas porosas y rígidas), lo cual modifica sustancialmente el comportamiento térmico de las mismas.

Por último, al ser un ensayo no destructivo de un bloque de aislamiento y no realizar ensayos sobre los propios materiales evaluados es posible incurrir en variaciones de la transmitancia térmica final del bloque de aislamiento debido a variaciones de composición o deficiencias continuas en la fabricación de componentes, que impactarían en el resultado final de transmitancia térmica y la causa quedaría oculta al análisis del bloque de aislamiento.

Como se detalla en el artículo redactado como parte de la presente tesis [5], la realización de un ensayo no destructivo tiene un impacto más significativo cuando se trabaja con bloques de aislamiento de sistemas constructivos tradicionales, donde aun cuando se determina el proceso constructivo utilizado se sigue desconociendo tanto la composición real de materiales como la proveniencia de los mismos. Donde, en sistemas tradicionales el proceso de construcción no se encuentra estandarizado, obteniendo alta variabilidad entre las muestras, así como la utilización de materiales de cercanía (barros, sustratos vegetales, etc.) conllevan a una alta incertidumbre en la selección de materiales y a su vez un error propagado a la transmitancia final del bloque de aislamiento.

Aunque esta metodología de caracterización presenta ciertos problemas, la inclusión de la misma en normativas y su extensa utilización como un valor factible de transmitancia térmica hace fundamental el análisis de pasos de dicha metodología, con el fin de establecer procedimientos asimilados por el sector y los técnicos competentes. Un ejemplo de los pasos necesarios para la aplicación de esta metodología puede observarse en la Ilustración 2.

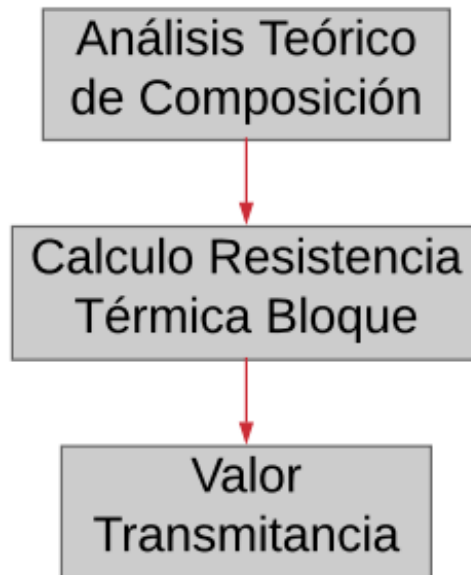


Ilustración 2. Pasos de aplicación de la metodología de caracterización térmica mediante capas homogéneas. Imagen propia.

Los valores teóricos de transmitancia térmica de materiales, utilizados en bloques de aislamiento, se pueden encontrar en normativas como ISO 6946:2007 [2], así como en tablas de diseño rápido dispuestas por el Código Técnico de la Edificación.

La metodología de caracterización térmica mediante capas homogéneas determina un valor de transmitancia térmica de los materiales (U-value) en función de la resistencia térmica total de los materiales que componen el bloque de aislamiento, siendo la relación entre el valor U de transmitancia térmica y la resistencia térmica del bloque la siguiente:

$$U\text{-value} = \frac{1}{R_t} \quad (1)$$

Donde la resistencia térmica de un bloque de aislamiento se determina siguiendo la siguiente ecuación:

$$R_t = R_{si} + R_{se} + \sum_{x=1}^n R_x \left(\frac{m^2 \cdot K}{W} \right) \quad (2)$$

Donde R_x son las resistencias parciales de las distintas capas de material que conforman el bloque de aislamiento, R_{si} y R_{se} son las resistencias superficiales, interior y exterior respectivamente, de los materiales expuestos al ambiente.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Cabe destacar que los valores de transmitancia térmica otorgados por la normativa ISO 6946 [2], así como el resto de guías técnicas, está determinado por la sección de material utilizado (proceso de transmisión térmica unidireccional, supone la dispersión térmica en un plano infinito), por lo que para establecer la resistencia térmica parcial de un material debemos aplicar la siguiente formula:

$$R_x = \frac{e}{\lambda} \left(\frac{m^2 \cdot K}{W} \right) \quad (3)$$

Donde, e (m) es el espesor de material utilizado y λ (W/m*K) es el valor de conductividad térmica teórico del propio material, siendo este último el valor que podemos obtener de normativas.

Aunque como ya se ha comentado, este proceso simplifica sustancialmente el cálculo final de transmitancia térmica de un bloque de aislamiento, la utilización de valores teóricos de transmitancia unidireccional de materiales perfectamente homogéneos, influencia sustancialmente el valor final de transmitancia.

A su vez, los materiales utilizados en edificación aunque siguen procesos de estandarización, tienen fuertes variaciones dependientes de la naturaleza de las materias primas utilizadas. Este efecto, unido a la baja granularidad en la naturaleza de los materiales cuando obtenemos los valores de conductividad térmica, acarrea errores de base en el cálculo de transmitancia final del bloque de aislamiento.

La Ilustración 3 muestra un ejemplo del efecto en la transmitancia térmica de un componente en función de la densidad de material utilizada en su fabricación, exponiendo la baja granularidad de los datos que se proporcionan así como el desconocimiento de porcentajes de composición.

| Materiales | ρ | λ | C_p | μ |
|------------|-----------|-----------|-------|-------|
| Genérico | 1800-2000 | 1.35 | 1000 | 60 |
| Genérico | 1600-1800 | 1.15 | 1000 | 60 |

Hormigón armado
 Hormigón en masa
 Hormigón con áridos ligeros

ρ : Densidad, en Kg/m³
 λ : Conductividad térmica, en W/m-K
 C_p : Calor específico, en J/Kg-K
 μ : Factor de resistencia a la difusión del vapor de agua, adimensional

Ilustración 3. Relación entre el valor de transmitancia térmica y la densidad del material, para el caso de un hormigón con áridos ligeros. Imagen obtenida de: <http://cte-web.iccl.es>.

Disponemos de la transmitancia de un hormigón con áridos ligeros en función de la densidad final del hormigón resultante final sin considerar variables de comportamiento con un alto impacto en el resultado final, como por ejemplo la granulometría de los áridos utilizados, porosidad de los mismos, humedad antes del proceso de fabricación u otras variables de los mismos, estableciendo una única diferencia entre materiales con densidades entre 1800 y 2000 Kg/m³ y materiales con densidades entre 1600 y 1800 kg/m³ [10].

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Como conclusión, aunque la metodología de caracterización térmica mediante capas homogéneas presenta ciertos problemas en casos específicos (construcción tradicional, variabilidad en procesos de fabricación, etc), la sencillez de aplicación y el rango de fiabilidad que se obtiene de la misma la convierte en un proceso útil como obtención de valores de situación para técnicos de la construcción. Aunque, debido tanto a los problemas planteados como a la variabilidad de los resultados obtenidos con la misma se recomienda encarecidamente el apoyo a la misma con análisis más detallados del bloque de aislamiento final utilizado en un proyecto de edificación.

Así pues, podemos enumerar los siguientes puntos como características fundamentales de la metodología de caracterización térmica mediante capas homogéneas:

- *Sencillez de aplicación*, utilizando valores de resistividad térmica de materiales y suponiendo planos sin dispersión térmica la obtención de un valor aproximado de transmitancia térmica puede ser excepcionalmente útil.

- *Normalizada y utilizada en legislación*, aunque en casos específicos se planteen problemas la amplia utilización de esta metodología en el sector, así como su inclusión en procesos de estandarización y en la legislación de edificación (CTE - Código Técnico de la Edificación) hace especialmente útil el conocimiento de la misma

- *Transmitancia térmica con alta variabilidad*, la baja granularidad en la determinación de la conductividad térmica de los materiales, así como posibles desconocimientos o variaciones en procesos constructivos tienen un impacto sustancial en los valores de transmitancia térmica obtenidos.

- *Amplia simplificación de transmisión térmica*, la suposición de planos infinitos donde no se contempla la dispersión térmica, así como no analizar la interacción entre capas de materiales y suponerla ideal tiene un impacto significativo en los resultados.

2.2.2 Metodología de caracterización térmica mediante capas heterogéneas

Intentando mejorar la fiabilidad de la metodología de capas homogéneas y solucionando uno de sus principales problemas, la alta variabilidad del valor obtenido debido al desconocimiento real del comportamiento térmico de ciertos materiales del bloque de aislamiento, se utiliza la metodología térmica mediante capas heterogéneas.

Esta metodología, al igual que la de capas homogéneas obtiene el valor de transmitancia térmica de un bloque de aislamiento mediante las sumas parciales de las resistencias térmicas de los materiales que la conforman, aunque en este caso la composición de las capas que conforman el bloque térmico es compleja y el valor de resistencia de dichos materiales es comúnmente determinado de manera empírica y no utilizando valores estándar o preestablecidos en normativa. Un ejemplo del proceso de aplicación de esta metodología puede observarse en la Ilustración 4.

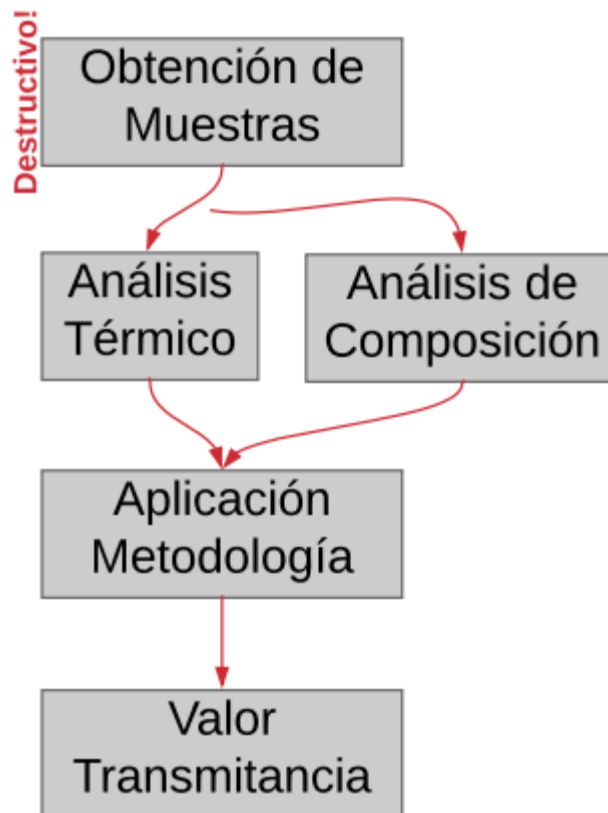


Ilustración 4. Pasos de aplicación de la metodología de caracterización térmica mediante capas heterogéneas. Imagen propia.

Para esto, se debe realizar ensayos de caracterización térmicos de los distintos componentes que conforman el bloque de aislamiento, por lo que esta metodología debe enmarcarse dentro de ensayos destructivos. A su vez, la extracción de material componente del bloque de aislamiento ofrece información adicional, sumamente relevante, del esquema constructivo del mismo [11].

La metodología se lleva a cabo en dos fases; una fase inicial descriptiva, donde extraemos materiales preparando las muestras de los distintos componentes y a su vez se determina con exactitud el tipo y cantidad de material que componen cada una de las capas del bloque de aislamiento. Una segunda fase, donde se analizan las muestras previamente extraídas con instrumentación de caracterización térmica siguiendo alguno del estándar ISO de caracterización.

Como se detalla en el apartado de instrumentación, existen múltiples modelos de instrumentación disponibles con el que caracterizar muestras de material, dependientes de rangos de transmitancia, tamaño de muestras y otros factores se establece el proceso y la instrumentación ideal a cada una de las muestras.

Obteniendo un valor real y fiable de la resistencia térmica de cada uno de los materiales que conforman el bloque de aislamiento. De esta manera, se evita propagar la alta variabilidad que implica utilizar valores de resistividad normalizados como en el caso en la metodología de capas homogéneas.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Por otra parte, obtener muestras de cada uno de los materiales que conforman el bloque de aislamiento permite que una vez caracterizados los mismos térmicamente puedan ser utilizados para otros análisis necesarios en construcción, rigidez de los materiales utilizados, comportamiento químico de los mismos o subsanación de posibles patologías presentes en los mismos.

Una vez obtenidos los valores reales de conductividad térmica de los materiales que componen el bloque de aislamiento, se prosigue con el mismo cálculo realizado en la metodología de capas homogéneas. Primero se determina la resistencia térmica de cada uno de dichos componentes, utilizando a su vez los valores obtenidos durante el análisis de composición, mediante la aplicación de la Ecuación 3. Seguidamente, se obtiene el valor de transmitancia (U-value) del bloque de aislamiento mediante la aplicación de la Ecuación 2 anteriormente expuesta.

Otro factor con un importante impacto en la usabilidad de esta metodología es el coste aplicación de la misma, coste tanto monetario como temporal. La realización de análisis detallados tanto del bloque de aislamiento al completo, análisis de composición, como de los materiales que forman las capas del mismo, análisis térmico mediante instrumentación descrita en normativas ISO, hace que sea necesario un amplio abanico temporal entre el diseño del bloque y la obtención de sus características térmicas.

Como conclusión, destacar las ventajas que la metodología de caracterización térmica mediante capas heterogéneas presenta, especialmente en comparación con la metodología de capas homogéneas, manteniendo en gran medida los procesos y cálculos realizados por parte de los técnicos, a la vez que minimiza posibles desviaciones del valor final de transmitancia térmica del bloque de aislamiento analizado.

Adicionalmente, las diferentes opciones de instrumentación planteadas en normativas ISO disponibles para el análisis de los materiales permiten determinar dicho valor en un amplio rango de tipología de muestras. Este factor es especialmente importante debido a la simplificación del proceso de extracción de materiales que se presenta al reducir las restricciones de características de las muestras que típicamente se establecen en el resto de análisis de materiales en el campo de la edificación, como son por ejemplo el tamaño de las muestras y el espesor de las mismas en su utilización, el rango de resistencias térmicas u otras variables físicas del material.

Así pues, podemos enumerar los siguientes puntos como características fundamentales de la metodología de caracterización térmica mediante capas heterogéneas:

- *Sencillez de aplicación*, manteniendo procesos asimilados por técnicos del sector e incrementando la fiabilidad de los valores de conductividad utilizados, se obtienen caracterizaciones térmicas de mayor fiabilidad.

- *Normalizada y utilizada en legislación*, aunque dicha metodología ya está planteada en normativas de edificación (CTE - Código Técnico de la Edificación) su utilización, según reflejan los profesionales del sector, no es tan extensa como la de capas homogéneas.

- *Análisis de carácter destructivo*, la necesidad de obtener muestras reales de los distintos materiales que conforman el bloque de aislamiento hace que tengamos que desmontar parte del mismo, impidiendo en ciertos casos específicos (estructuras protegidas o con alto valor histórico) la aplicación de esta metodología.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

- *Coste de aplicación*, tanto el coste monetario como el coste temporal de la aplicación de esta metodología es mayor que en el caso de la de capas homogéneas, aunque una mejora en fiabilidad de las medidas puede repercutir de manera indirecta favorablemente en coste final del bloque de aislamiento analizado.

2.2.3 Metodología de caracterización térmica mediante caja caliente

Intentando mejorar la calidad de caracterización térmica que se realiza de un bloque de aislamiento, se establece un ambiente térmico controlado con un tamaño suficiente como para exponer una muestra completa del bloque de aislamiento, de esta manera no únicamente minimizamos posibles variaciones entre el valor de conductividad térmica entre el valor real y teórico de las diferentes capas que componen el bloque, sino que a su vez se contempla las interacciones de los diferentes materiales entre ellos mismos.

Adicionalmente, esta metodología es especialmente útil para detectar posibles variaciones en la continuidad del aislamiento en un bloque, dado que es capaz de mapear el valor de transmitancia térmica en diferentes puntos y compararlos. Siendo este el principal caso de aplicación de la metodología, especialmente en bloques de aislamientos complejos o que incluyan elementos de baja resistencia térmica (Muros con ventanas, puertas, tragaluces, etc.).

La metodología de caracterización térmica mediante caja caliente es la primera metodología de las expuestas que contempla el funcionamiento transitorio del bloque de aislamiento. Analizando no únicamente el valor de transmitancia que se obtiene al exponer el mismo a un gradiente térmico estable, así como posibles variaciones de dicho valor de transmitancia térmica cuando el gradiente térmico no es estable y tenemos un flujo térmico variable en el interior del bloque térmico.

Para esto, se expone una muestra del bloque de aislamiento al completo a un gradiente térmico, dependiendo de la normativa ISO aplicada la muestra está en contacto con una superficie con una temperatura superior a la ambiental y otra temperatura inferior a la misma en el lado opuesto, o se disponen en contacto directo con un foco caliente y frío. Como se puede observar en la Ilustración 5, el tamaño del instrumento de medición es suficientemente grande como para contener una muestra de un tamaño suficiente como para que el resultado sea representativo.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.



Ilustración 5. Instrumento caja caliente para la caracterización térmica de muros y ventanas. Imagen propiedad de Oak Ridge National Laboratory.

Disponer de una muestra con todos los componentes que la conforman en un funcionamiento estacionario permite obtener los saltos térmicos que proporcionan cada una de las capas que componen la muestra. Este valor es importante con el fin de estudiar posibles mejoras en el esquema de composición de los bloques de aislamiento, mejorando cualidades de la misma como la resistencia a generar condensación.

Analizando el bloque de aislamiento al completo como una única muestra permite obtener un valor de transmitancia directa, contemplando todos los materiales que conforman la muestra en un mismo análisis, y real del conjunto de capas de material que conforman el mismo. Esto es especialmente significativo debido a que este es el único caso en el que podemos observar el efecto de la interacción entre capas de aislamiento, determinando a su vez un correcto funcionamiento si comparamos los valores de gradiente térmico teóricos con los obtenidos directamente de la muestra [5].

Otro aspecto importante en la aplicación de esta metodología, es la posibilidad de obtención de un valor de dispersión térmica de la muestra, debido al tamaño representativo y la posibilidad de analizar la dispersión térmica de la muestra, es posible determinar la cantidad de flujo térmico que se transmite en el interior del bloque de aislamiento.

Esta metodología de caracterización agranda sustancialmente el principal problema que se planteaba en la metodología de caracterización térmica mediante capas heterogéneas, la cual es el coste. En este caso no únicamente es necesaria la utilización de técnicos formados para el uso de la instrumentación de medida, sino que el proceso de medida debe ser analizado por

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

laboratorio con el fin de determinar valores no triviales como deficiencias internas del material o desviaciones térmicas del comportamiento teórico de las capas. Por otra parte, el coste del instrumento de medición es proporcional al tamaño de la muestra que se desee analizar, siendo ordenes de magnitud superior el sistema de caracterización caja caliente de un muro de aislamiento al de una muestra de unos 400 cm³ en el caso de la metodología mediante capas heterogéneas.

Destacar las ventajas que la metodología de caracterización térmica mediante capas heterogéneas presenta, especialmente en comparación con la metodología de capas homogéneas, manteniendo en gran medida los procesos y cálculos realizados por parte de los técnicos, a la vez que minimiza posibles desviaciones del valor final de transmitancia térmica del bloque de aislamiento analizado.

Como conclusión, destacar las ventajas de utilización de la metodología mediante caja caliente donde obtenemos un valor directo de la transmitancia térmica del bloque de aislamiento dado el análisis del mismo al completo. Lo que nos permite analizar bloques de aislamiento bastante complejos y con elementos no continuos, como pueden ser ventanas, puertas u otros puntos específicos.

Esto a su vez, proporciona un abanico de características y cualidades que las metodologías anteriormente expuestas no son capaces de extraer, como es el caso de la dispersión térmica dentro del propio material, el efecto que produce sobre la transmisión total la interacción entre las diferentes capas de material o más importante la respuesta del bloque de aislamiento a variaciones transitorias del flujo térmico al que se expone.

Así pues, podemos enumerar los siguientes puntos como características fundamentales de la metodología de caracterización térmica mediante 'Hot Box':

- *Alta fiabilidad*, la obtención de un valor de transmitancia real del bloque de aislamiento al completo proporciona valores de caracterización altamente fiables y un análisis del sistema de edificación final lo más cercano al real posible.

- *Múltiples normas de aplicación y adaptable a la casuística concreta*, disponer de múltiples normativas para aplicar diferentes instrumentaciones en la misma metodología permite la adecuación de los procesos a la muestra concreta a analizar, mejorando en consiguiente los resultados obtenidos.

- *Análisis de carácter semidestructivo*, aunque en principio el proceso de análisis no tiene un carácter destructivo la necesidad de obtener una muestra representativa del bloque de aislamiento, así como la imposibilidad en muchos casos de realizar medidas fuera de laboratorio, hace que la muestra tenga que ser en la mayoría de los casos desechada o relegada a procesos de testeo, sin poder recuperarla como elemento constructivo.

- *Coste de aplicación*, como en casos anteriores, y con un impacto mayor aun en esta metodología, el coste tanto en personal como monetario de aplicación de la metodología hace que este proceso sea usado minoritariamente y sea relegado a casos de certificación o proyectos de muy gran envergadura.

2.3 Instrumentación de caracterización térmica

La aplicación de las anteriores metodologías de caracterización térmica se realiza mediante la utilización de diversa instrumentación, capaz de analizar y determinar los parámetros a evaluar con una precisión oportuna a cada una de las casuísticas. Por esto podemos determinar diferentes instrumentos en función de las necesidades de cada una de las metodologías, variando desde una alta precisión y muestras de un tamaño especialmente reducido, como es el caso de la metodología de caracterización mediante capas heterogéneas, hasta instrumentos con menor precisión, pero capaces de analizar bloques de aislamientos completos, tales como muros, fachadas o cubiertas.

El principio básico de funcionamiento de estos instrumentos se basa en la determinación de la resistencia térmica de una muestra mediante el conocimiento del flujo térmico y las temperaturas a las que está expuesta la misma, como se observa en la Ecuación 4. Esto permite la posibilidad de determinación del valor de resistencia térmica de un bloque de aislamiento mediante múltiples procesos, como es la posibilidad de establecer de forma conocida uno de los parámetros y analizar la respuesta en el resto con el fin de determinar el valor de resistencia térmica final.

$$R_x = \frac{(T_{cx} - T_{fx})}{q_x} \left(\frac{m^2 \cdot K}{W} \right) \quad (4)$$

Donde el denominador refleja el gradiente térmico entre las caras expuestas a un flujo térmico, siendo T_{cx} la temperatura de la cara caliente, T_{fx} la temperatura de la cara fría y el numerador q_x el flujo térmico por unidad de superficie que atraviesa la muestra a analizar

Por estas razones, es necesario establecer los requisitos que imponen cada una de las diferentes normativas anteriormente nombradas, así como diversos usos adicionales que pueden establecer las diferentes herramientas utilizadas para la caracterización térmica de materiales o sistemas constructivos complejos, como puede ser un bloque de aislamiento.

Las metodologías que se analizan son:

- Basadas en ISO 8990 [12] “caja caliente guardada” instrumento de precisión media y con una capacidad de muestra muy elevada, permitiendo analizar sistemas complejos o incluso elementos constructivos al completo.
- Basadas en ISO 8302 [13] “plancha caliente guardada” instrumento de alta precisión y dependiente de un ambiente muy controlado, el cual nos permite determinar con amplia precisión características térmicas de materiales o pequeñas muestras.
- Basadas en ISO 8301 [14] “aparato de medición de flujo térmico” instrumentos mucho más versátiles que los anteriores que nos permite establecer ensayos con alta o media precisión. La posibilidad de utilizar múltiples instrumentos simultáneamente permite el análisis y medición de una amplia variedad de muestras desde ensayos con un único material y ambiente controlado, hasta ensayos de viviendas al completo con ambientes con un régimen de funcionamiento transitorio.

A continuación, se detalla el funcionamiento, base de normativa y sus aplicaciones dentro de cada una de las metodologías, de los instrumentos más característicos y de un uso más extendido en el ámbito de la caracterización térmica. Aunque no todos los instrumentos

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

disponibles son analizados, los aquí expuestos permiten establecer bases de funcionamiento y necesidades de diversas metodologías, lo que nos permite definir las flaquezas de las mismas y establecer un patrón de diseño para el desarrollo de un instrumento capaz de adaptarse a las mismas y solventar problemáticas presentes.

2.3.1 ISO 8990:1994 Determinación de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario. Métodos de la caja caliente guardada y calibrada.

La normativa ISO 8990, siendo su semejante en normativa ASTM la C1363, determina el valor de transmitancia térmica (U-value) de un bloque de aislamiento, en función de la transmisión de calor por el mismo cuando se expone a un ambiente con un gradiente térmico entre las caras del mismo y los diferenciales de temperatura que se producen bajo unas condiciones en régimen estacionario.

Este instrumento está compuesto de dos cámaras, una cámara de medición que proporciona un gradiente térmico emitiendo aire con una cantidad de calor conocida, Metering Chamber en la Ilustración 6, y una cámara climática donde se recoge aire y se analiza la cantidad de calor que transporta el mismo (Climatic Chamber). La muestra de bloque de aislamiento a analizar se dispone como barrera entre ambas cámaras y se sellan todos los posibles pasos térmicos que puedan quedar entre las mismas (Guard Area), exponiendo así la muestra (Specimen) a un gradiente térmico del que conocemos el flujo térmico al que está expuesta. Un esquema de aplicación de esta tipología de instrumentación puede observarse en la Ilustración 6.

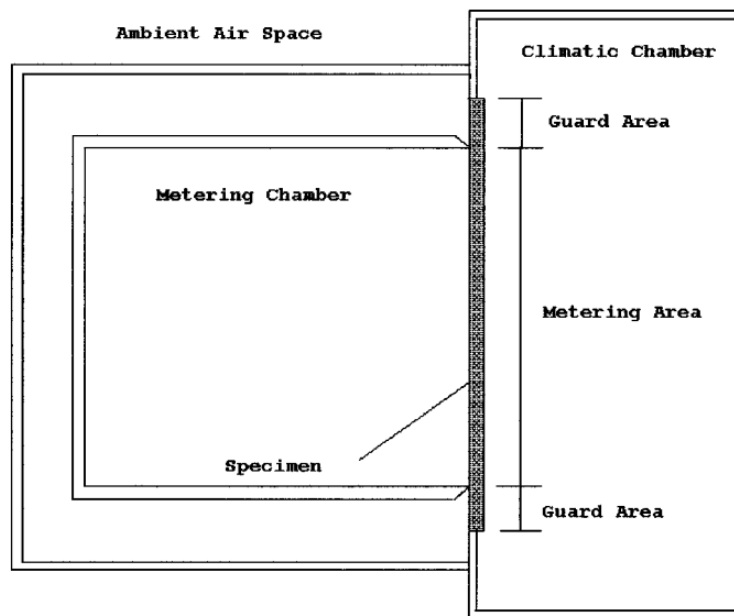


Ilustración 6. Esquema de aplicación del instrumento dispuesto en la normativa ISO 8990:1994. Imagen propiedad de ISO.

Así pues, el instrumento descrito en ISO 8990 realiza medidas directas de temperatura y en su aplicación se conoce con detalle el área expuesta a los ambientes controlados. Aunque, el valor

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

de flujo térmico que atraviesa la muestra de bloque de aislamiento no se mide directamente, el análisis del calor transportado entre cámaras es directamente relacionada con el flujo térmico que atraviesa la muestra [12]. Este testeo debe realizarse sobre un periodo de tiempo suficiente en el que la muestra llegue a un régimen estacionario y los gradientes térmicos se mantengan en el tiempo. A su vez, mantener el régimen estacionario un tiempo prudencial ayuda a conseguir valores con un rango de fiabilidad adecuada a su utilización en construcción.

Esta tipología de instrumentación intenta minimizar los errores de medición producidos por pérdidas de calor del propio instrumento de medición, Q_{fl} en la Ilustración 7, para ello utiliza dos posibles soluciones con las que analizar y posteriormente tener en consideración las pérdidas de barrera o límites a la muestra. Una solución es establecer una cámara de protección, segunda guarda, del propio instrumento al completo, al establecer una resistencia térmica mayor que la de la propia muestra hacia el exterior y con las mismas condiciones límite, minimizamos las posibles pérdidas de transmisión entre la muestra y los componentes que conforman las cámaras. Otra posible solución consiste en la medición directa de las pérdidas de barrera y considerarlas en el cálculo de transmitancia térmica del bloque de aislamiento.

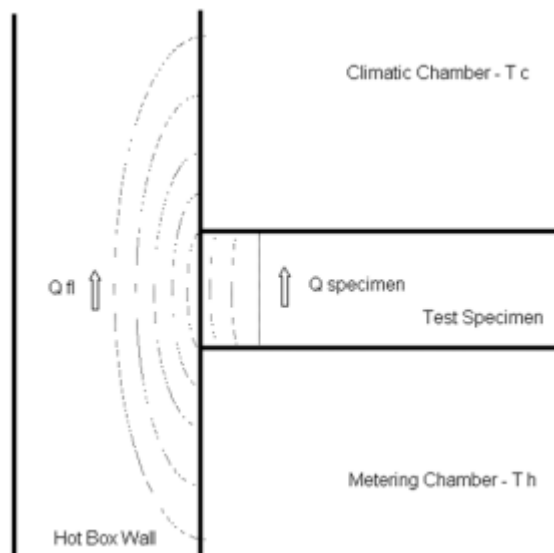


Ilustración 7. Detalle del encuentro entre la muestra analizada y el instrumento dispuesto en la normativa ISO 8990:1994. Imagen propiedad de ISO.

Debe presentarse especial atención durante el uso del instrumento de caracterización ante posibles humedades dentro de las cámaras que conforman el mismo, posibles condensaciones o evaporaciones de vapor de agua conllevan lecturas erróneas de flujo térmico y propician errores de medición de la transmitancia del bloque de aislamiento. Por esto, la utilización de instrumentación de caja caliente guardada debe realizarse en lugares secos y protegidos [12].

La normativa que marca las pautas de aplicación de esta tipología de instrumentación y establece a su vez los requisitos de sensorización mínimos de los que ha de disponer un sistema de caja caliente con guarda para un correcto funcionamiento. Estos requerimientos establecen tamaños, composiciones y pérdidas límite de los componentes que forman tanto la cámara de medición como la cámara climática.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

A su vez, la normativa establece los requisitos mínimos de cada uno de los componentes que conforman el experimento, estableciendo desde velocidades de aire mínimas en el interior de las cámaras, número mínimo de puntos de medida de temperatura, tamaño y potencia mínima de los sistemas de calentamiento y enfriamiento utilizados, así como los rangos de funcionamiento máximos a los que se puede exponer el interior de ambas cámaras.

En resumen, esta tipología de instrumentación obtiene valores de caracterización térmica de bloques de aislamiento al completo, sin un análisis específico de los diferentes materiales que conforman la muestra. Esta tipología de instrumentación proporciona el valor de transmitancia térmica fiables en un estado de régimen estacionario.

Por otra parte, las restricciones que impone la norma en todas las facetas tanto constructivas como de aplicación y medición de la misma, conllevan un elevado coste de aplicación y restringe el acceso a ensayos con la misma a muestras con necesidades específicas (certificaciones, aplicaciones militares, etc). Este factor, conlleva que el sistema no sea utilizado por técnicos utilizando bloques de aislamiento de diseño propio o en el caso de utilización de materiales naturales o de cercanía, de los que no se disponga de un estudio previo.

2.3.2 ISO 8302:1991 Determinación de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario. Métodos de la plancha caliente guardada.

La normativa ISO 8302:1991, siendo su semejante en normativa ASTM la C177, determina el valor de transmitancia térmica (U-value) de un bloque de aislamiento, en función del flujo térmico que atraviesa cuando es expuesto a una plancha de transmisión térmica que produce un gradiente de temperatura entre las caras del mismo.

En esta tipología de instrumentación, se disponen dos muestras de material a cada una de las caras de una plancha caliente, normalmente guardada en sus extremos por material aislante, y al lado contrario de las muestras se dispone un elemento refrigerado. Con esto, se consigue obtener un flujo térmico constante y unidireccional entre las planchas, minimizando a su vez la dispersión térmica. El diagrama de colocación de los componentes y materiales puede observarse en la Ilustración 8.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

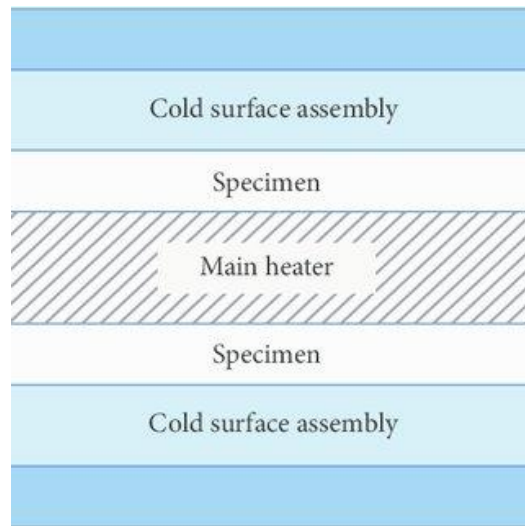


Ilustración 8. Esquema colocación capas interiores del instrumento siguiendo normativa ISO 8302:1991. Imagen propiedad de ISO.

La tipología descrita en ISO 8302 al igual que la descrita en ISO 8990 basa su funcionamiento en mantener un flujo térmico constante, por lo que es necesario una aclimatación previa de las muestras y el propio sistema de medida. Así como el conocimiento de las características físicas de la muestra a analizar, área expuesta, espesor y densidad del mismo.

La utilización de dos fuentes térmicas, aunque manteniendo ciertos principios de funcionamiento con los realizados con el método de caja caliente guardada, permite un alto control del flujo térmico al que se expone la muestra lo cual tiene relación directa con el rango de resistencias térmicas que permite analizar, como expone la ecuación

de emisión calorífica que nos permite la utilización de una plancha caliente guardada. La utilización de la plancha caliente permite la medición de materiales con una transmitancia térmica baja, considerados aislantes térmicos.

La utilización de dos muestras de testeo viene determinada por la exigencia de obtener un único flujo térmico unidireccional, con el fin de evitar flujos térmicos turbulentos en una posible base de plancha caliente adyacente a un material aislante. Para esto, disponiendo de dos muestras de material de espesor similar a cada una de las caras de la plancha caliente introducimos una misma resistencia térmica por ambos lados, evitando posibles desequilibrios del flujo entre ambas direcciones. Esto a su vez impone dos restricciones del sistema bastante notables, el espesor de las muestras ha de ser lo más similar posible y las superficies de contacto entre plancha caliente y muestra debe ser lo más plana posible, con el fin de mejorar la conductividad entre ambas.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

La normativa que rige esta tipología de instrumentación de caracterización, debido a su actual redacción, es mucho más abierta en las soluciones que pueden plantearse tanto en la fabricación del propio instrumento como en la preparación y procesado de muestras. De manera que expone los requisitos de funcionamiento del instrumento, tipos de materiales a utilizar, dimensiones de los mismos, como procedimientos y preparativos de realización de ensayos, dejando abierta la posibilidad de utilización de materiales más novedosos, nuevos sistemas de sensorización o incluso la sustitución de los mismos si se cumplen ciertas restricciones.

Un ejemplo de sistema laxo pero específico podemos encontrarlo en la utilización de guardas laterales, donde normativas anteriores [12] imponían el uso de ciertas guardas constituidas de un material concreto y con espesores determinados, la normativa de instrumentación mediante plancha caliente impone una restricción del 5% entre el gradiente térmico de barrera de la muestra y el gradiente térmico entre la plancha caliente y fría al que está expuesto la muestra. De esta manera, en caso de disponer de un sistema con un aislamiento exterior tal que se cumpla la restricción impuesta en la Ecuación 5, es posible evitar el uso de guardas laterales.

$$\frac{(T_e - T_m)}{\Delta T} < 0.05 \quad (5)$$

En resumen, esta tipología de instrumentación obtiene valores de transmitancia térmica con una alta precisión, aunque para ello impone numerosas restricciones en las características de los materiales a analizar [13]. El alto nivel de fiabilidad de las medidas que obtenemos y los nombrados requisitos que se imponen a las muestras hacen que la aplicación de esta tipología de instrumentación sea ideal para la determinación de materiales de composición del bloque de aislamiento por sí solos, en especial estos con una transmitancia térmica reducida.

Por otra parte, y al contrario que en el caso del método de caja caliente con guarda, el método de plancha caliente no considera la interacción entre materiales debido a que el análisis que hace de los mismos es por separado y con unas características de contacto muy restringidas. De manera que obtenemos valores de transmitancia térmica del material con una alta precisión, sin embargo, no conocemos con exactitud el valor final de transmitancia térmica que tendrá el material cuando lo dispongamos con una forma concreta y en contacto con las capas adyacentes que disponga el bloque de aislamiento analizado.

2.3.3 ISO 8301:1991 Determinación de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario. Métodos de aparato de medición de flujo térmico.

La normativa ISO 8301:1991, siendo su semejante en normativa ASTM la C518, determina el valor de transmitancia térmica (k) de un bloque de aislamiento, en función de la medición directa del flujo térmico que atraviesa una muestra de material a analizar. Para esto, esta tipología de instrumentación utiliza transductores de flujo térmico, sensores capaces de establecer un valor de flujo térmico direccional [15].

Esta tipología de instrumentación al igual que en el método de plancha caliente dispone de cierta variabilidad en el proceso de fabricación del instrumento, así como en la realización de los ensayos. En el caso del esquema de composición del instrumento es posible establecer diferentes configuraciones, todas ellas con ciertas ventajas e inconvenientes que las hacen idóneas para el análisis de diversas muestras.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

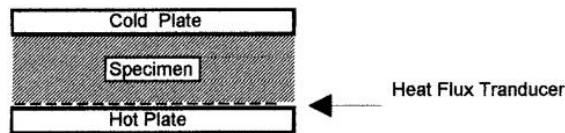


FIG. 1 Apparatus with One Heat Flux Transducer and One Specimen

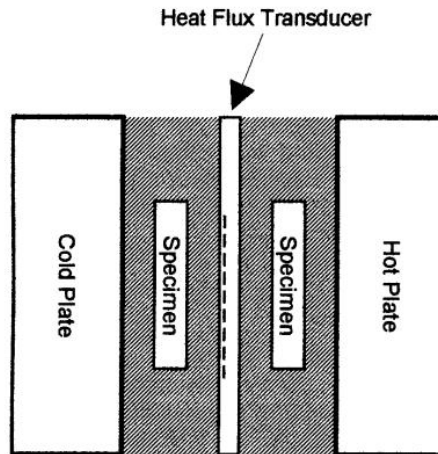


FIG. 2 Apparatus with One Heat Flux Transducer and Two Specimens

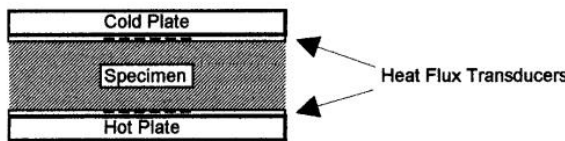


FIG. 3 Apparatus with Two Heat Flux Transducers and One Specimen

Ilustración 9. Ejemplos de aplicación de la normativa ISO 8301:1991, para los casos donde únicamente se disponga de una muestra y un transductor de flujo, dos muestras y un transductor, o una muestra y dos transductores. Imagen propiedad de ISO.

Dependiendo de las características previas conocidas de la muestra, es posible utilizar sistemas de doble muestra en caso de disponer de un material de baja transmitancia, o sistemas de doble transductor de flujo en muestras con una composición no completamente homogénea. Ejemplos de estas configuraciones, aunque se permiten un mayor número de las mismas, puede observarse en la Ilustración 9, donde, de arriba hacia abajo, observamos un sistema de aparato con una única muestra y un único transductor de flujo, un sistema de doble muestra y transductor de flujo único, o un sistema de una única muestra y doble transductor de flujo térmico.

El proceso de funcionamiento de un transductor térmico hace que el sensor proporcione un valor de tensión (ε) diferente dependiendo del flujo térmico instantáneo que circule por el mismo. Obteniendo el valor de flujo térmico por unidad de superficie en función de un valor de calibración del sensor (S), propio al sensor específico y que debe ser calibrado después del proceso de fabricación. Obteniendo el valor de resistencia térmica de la muestra, una vez conocido el gradiente térmico al que se expone (ΔT), siguiendo la siguiente ecuación:

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

$$R = S * \varepsilon * \Delta T \quad (6)$$

En el caso de disponer de dos o más transductores térmicos el valor de flujo térmico del sensor, obtenido mediante la multiplicación del valor de tensión obtenido por el mismo (ε) y el factor de calibración del sensor (S), será la media de los diversos valores medidos. En el caso de múltiples muestras y un único transductor de flujo, el valor del incremento térmico de ambas muestras debe ser introducido, siendo ΔT el siguiente:

$$\Delta T = \Delta T_a + \Delta T_b \quad (6)$$

Uno de los principales inconvenientes de esta tipología de caracterización está presente en la necesidad de calibrar el sistema con cierta frecuencia, imponiendo las normas que rigen este método con un límite máximo de 30 días [14]. A su vez impone una desviación máxima de las medidas entre procesos de calibración del 1%, invalidando toda medida que se haya realizado en el periodo.

En resumen, esta tipología de instrumentación obtiene valores de transmitancia térmica de una muestra con una precisión aceptable, precisión intermedia entre tipologías de instrumentación mediante caja caliente y plancha caliente. Esto proporciona al sistema de caracterización mediante transductor de flujo térmico, modelo idóneo en la caracterización de componentes del bloque térmico con una transmitancia térmica media o elevada.

Esta tipología al igual que en el caso de plancha caliente, no se realizan medidas del bloque térmico al completo, por lo que aunque tenemos conocimiento preciso del comportamiento de cada uno de los materiales que conforman el mismo y metodologías que nos proporcionan un valor muy aproximado al valor final de transmitancia térmica, no se analiza el bloque térmico al completo. El desconocimiento del comportamiento final, con las características y esquema final, del bloque térmico propicia ciertas dudas del valor final de transmitancia térmica obtenido.

Adicionalmente, las necesidades de calibración de esta tipología de instrumentación, como mínimo cada 30 días, y anulando la validación de análisis anteriores en caso de desviaciones del rango aceptable, hace que este instrumento únicamente pueda ser utilizado por laboratorios especializados y no por los propios técnicos de diseño del bloque de aislamiento, ni de una forma tan ágil y rápida como sería requerido en pruebas de diversos aislamientos [16].

Referencias

- [1] Jelle, B.P., Gustavsen, A. and Baetens, R. (2010). "The path to the high performance thermal building insulation materials and solutions of tomorrow". *Journal of Building Physics*, 34(2), pp.99-123.
- [2] E. Delzende, S. Wu, A. Lee, Y. Zhou. (2017). "The impact of occupants' behaviours on building energy analysis: A research review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.264>.
- [3] A. Mahdavi, C. Pröglhöf. (2009). "User behavior and energy performance in Buildings" Department of Building Physics and Building Ecology, Vienna University of Technology.

- [4] A. Sedlakova, L. Tazky, S. Vilcekova, E.K. Burdova. (2015). "Use of traditional and non-traditional materials for thermal insulation of walls". *Applied Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies-Proceedings of the International Conference on Engineering Sciences and Technologies*. ESaT (pp. 387-392).
- [5] C. Carmona, G. Horrach, F. Masdeu, J. Muñoz. (2018). "Comparative analysis of thermal characterisation methodologies of a historical double leaf masonry wall". *International Journal of Masonry Research and Innovation*. 3. 403. 10.1504/IJMRI.2018.095704.
- [6] N. Soares, C. Martins, M. Gonçalves, P. Santos, L. Simões da Silva, J. J. Costa. (2019). "Laboratory and in-situ non-destructive methods to evaluate the thermal transmittance and behavior of walls, windows, and construction elements with innovative materials: A review". *Energy and Buildings*, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.021>.
- [7] L.D. Pereira, V. Tavares, N. Soares. (2021). "Up-to-date challenges for the conservation, rehabilitation and energy retrofitting of higher education cultural heritage buildings", University of Coimbra, ADAI, Department of Mechanical Engineering, 10.3390/su13042061
- [8] ISO. ISO 6946:2017. (2017). "Building components and building elements — Thermal resistance and thermal transmittance — Calculation methods", International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/65708.html>.
- [9] E. Enríquez, V. Fuertes, M.J. Cabrera, J. Seores, D. Muñoz, W. More, J.F. Fernández. (2018). "Model to evaluate the thermal comfort factor: Dynamic measurement of heat flow in building materials". *Journal of Building Engineering*, 20, pp.344-352.
- [10] Instituto Eduardo Torroja, CEPCO y AICIA, (2010). "Catálogo informático de elementos constructivos (CEC)", Ministerio de Fomento.
- [11] A. Lakatos. (2014). "Measurements of thermal properties of different building materials". In *Advanced Materials Research* (Vol. 1016, pp. 733-737). Trans Tech Publications Ltd.
- [12] ISO. ISO 8990:1994. (1994). "Thermal insulation — Determination of steady-state thermal transmission properties — Calibrated and guarded hot box", International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/16519.html>.
- [13] ISO. ISO 8302:1991. (1991). "Thermal insulation — Determination of steady-state thermal resistance and related properties — Guarded hot plate apparatus", International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/15422.html>.
- [14] ISO. ISO 8301:1991. (1991). "Thermal insulation — Determination of steady-state thermal resistance and related properties — Heat flow meter apparatus", International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/15421.html>.
- [15] A. Rasooli, L. Itard. (2018). "In-situ characterization of walls' thermal resistance: An extension to the ISO 9869 standard method". *Energy and Buildings*, 179, pp.374-383.
- [16] M.B. Ducharme, J. Frim, P. Tikuisis. (1990). "Errors in heat flux measurements due to the thermal resistance of heat flux disks". *Journal of Applied Physiology*, 69(2), pp.776-784.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

3 - Caja natural de plancha caliente

El primer instrumento como tal que se desarrolla en el presente trabajo y el cual sostiene una función de caracterización térmica es la caja natural de plancha caliente. Dicha caja se basa en dos de las metodologías de caracterización previamente establecidas, como son la ISO 8990 y la 8302, en estas normativas se establecen las metodologías de caracterización base para el uso de cajas calientes, donde manteniendo unos niveles térmicos controlados se determina las características de los elementos analizados. Aunque dichas normativas disponen de sistemas de instrumentación comerciales, los cuales pueden ser adaptados a las necesidades presentes en construcción, dicha aplicación presenta diversos inconvenientes que hacen difícil su aplicación en procesos iniciales de diseño constructivo.

Otro aspecto de aplicación del sistema de caja natural diseñado es la determinación de sistemas complejos formados con algún material de resistencia térmica desconocida o incluso la determinación del efecto de interacción entre diferentes materiales lo que supone cierto nivel de incertidumbre.

Adicionalmente, cuando se realizan acciones de rehabilitación sobre cerramientos donde sus características térmicas no son completamente conocidas o cuando se utilizan elementos naturales, como puede ser la construcción con barro o fibras vegetales, la necesidad de conocer las características térmicas de dichos sistemas constructivos es imperativa debido a la obligatoriedad de cumplir con el Documento Básico de Ahorro Energético (DB-HE) [1]. DB establecido en el Código Técnico de la Edificación (CTE) Ley 38/1999 de 5 de noviembre, en el que es necesario determinar un valor mínimo de aislamiento para los cerramientos del edificio objeto. En el caso de desconocimiento o no disposición de valores de caracterización térmica específicos del material utilizado, los proyectistas y constructores utilizan valores aproximados o medios, los cuales se encuentran alejados del valor real de los sistemas constructivos utilizados.

Como se ha planteado anteriormente, los principales inconvenientes de utilizar cajas calientes con guarda en procesos de diseño constructivo, con el fin de determinar características específicas a materiales o sistemas constructivos complejos, son el coste asociado al mismo y el tiempo de aplicación de dichas metodologías.

Por una parte, enviar muestras preconstruidas a analizar tiene tanto un coste monetario como un coste temporal muy importante, así como limitaciones por parte de los laboratorios de análisis debido a tamaños límite de las muestras o procesos de secado de las mismas [2]. Por otra parte, disponer de un sistema de caracterización propio tiene un coste no asumible por los interesados, donde el alto coste de dicha instrumentación es debido al amplio rango de trabajo de dichos instrumentos, enfocados al análisis de materiales con niveles de aislamiento muy altos y fuera de los rangos típicos utilizados en construcción, así como el tamaño de muestra a analizar, donde en sistemas constructivos complejos puede superar los 2500cm², cuando los tamaños estándar de muestras en laboratorio no superan los 400cm². En la Ilustración 10 se puede observar un ejemplo de instrumentos de caja caliente con guarda comerciales son NETZSCH GHP 456 Titan, aunque existen múltiples opciones en el mercado de otras marcas comerciales como puede ser TAURUS TLP 500 HT.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.



Ilustración 10. Ejemplo sistema comercial caja caliente NETZSCH GHP 456 Titan. Imagen propiedad de Netzsch.

A su vez, el proceso de caracterización de materiales o sistemas complejos mediante caja caliente con guarda tiene un tiempo de ejecución bastante elevado lo cual tiene un gran impacto en construcción debido a las típicas limitaciones temporales de los proyectos. En el caso de la normativa ISO 8302:1991 [2] el proceso de acondicionamiento de las muestras debe estabilizar tanto la temperatura como la humedad de la muestra a unas condiciones de equilibrio predeterminada, que en el caso de materiales constructivos puede conllevar un secado y procesado con una duración de semanas.

Debido a dichos inconvenientes se plantea el diseño y construcción de un instrumento de caracterización térmica, que permita la obtención de un valor de resistencia térmica de un elemento constructivo, ya sea un material sencillo o un elemento constructivo al completo, de una manera sencilla y rápida. Donde el coste de fabricación y utilización sea reducido y el tiempo de análisis se reduzca al mínimo permitido por los requerimientos de las normativas y legislaciones aplicables.

3.1 Base de funcionamiento.

Inicialmente se plantea un sistema de caracterización térmica capaz de determinar el valor de transmitancia térmica ($W/m^2 \cdot K$) de una muestra de material o de un elemento complejo que incorpore dicho material. Esto determina que el funcionamiento principal de análisis es un estado estacionario, donde se analizan las variables de condición una vez alcanzado un estado completamente estable en el tiempo.

Basándose en el funcionamiento de la metodología descrita en ISO 8302:1991 “Determinación de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario. Métodos de la plancha caliente guardada.” [2], donde una muestra del material a analizar se expone a un gradiente térmico entre sus caras, a la vez que se restringe el flujo térmico al cuerpo de la misma impidiendo difusión y pérdidas de flujo térmico con el ambiente, la resistencia térmica se establece mediante la determinación del flujo térmico que circula por el cuerpo de la muestra, ya sea mediante la medición directa de dicho flujo térmico utilizando transductores de flujo térmico o controlando el flujo térmico suministrado que permita un funcionamiento térmico estacionario.

Se propone una modificación de la metodología de caja caliente calibrada con la que minimizar tanto el tiempo de acondicionamiento de las muestras a analizar como el coste del propio instrumento, utilizando únicamente una temperatura estable y controlada y una temperatura conocida, aunque no controlada.

La utilización de la temperatura ambiental como una de las temperaturas de exposición de la muestra conlleva ciertas ventajas e inconvenientes que deben ser analizados y considerados como variaciones térmicas que imposibilitan un funcionamiento en régimen estacionario constante, variaciones de humedad relativa exterior modificando la capacidad térmica del propio elemento analizado y el desconocimiento de la velocidad de viento exterior, que puede favorecer la absorción térmica.

Así pues, el sistema es capaz de determinar la transmitancia térmica de un elemento en función de un gradiente térmico entre dos caras del mismo, donde en una de las caras tenemos una temperatura suministrada por un foco de calor controlado T_H y en la cara opuesta tenemos la temperatura ambiente del instrumento T_{amb} , así como el valor capturado de flujo térmico F_c que atraviesa la muestra de material cuando el sistema funciona en un estado semiestacionario. Podemos observar un esquema simplificado de las variables capturadas en la Ilustración 11.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

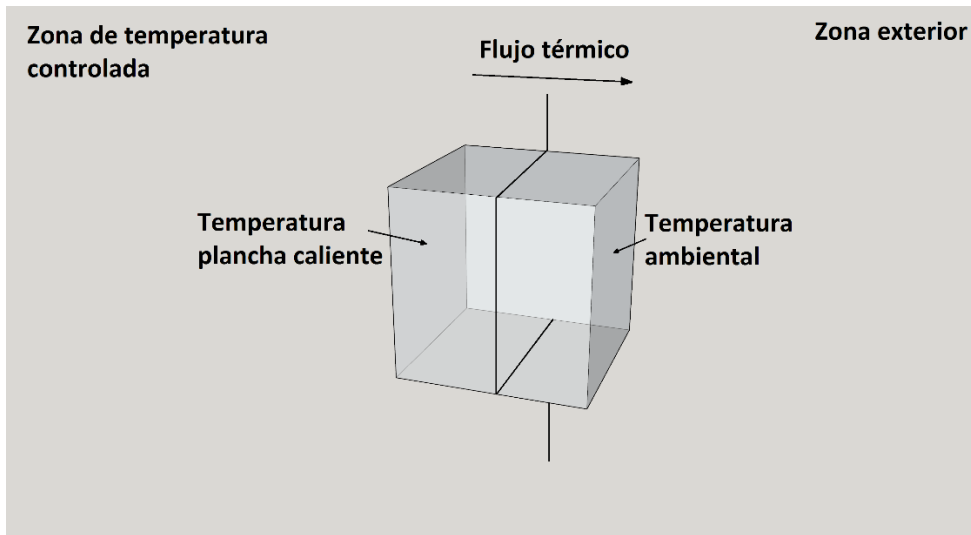


Ilustración 11. Variables de captura caja natural de plancha caliente. Imagen propia.

El incremento térmico se realiza mediante un sistema de control térmico compuesto por una fuente de alimentación controlada digitalmente y una plancha resistencia de 0.22mx0.22mx0.003m, capaz de suministrar hasta 250W de potencia. Dado el modo de funcionamiento de dicha plancha caliente, elemento resistivo en forma de espiral el funcionamiento del mismo genera fuertes interferencias radiomagnéticas, por esto se deben plantear protecciones que eviten el impacto adverso de dichas interferencias en los sistemas de captura de datos y transductores dispuestos en el instrumento.

Para evitar la propagación del campo magnético inducido por la plancha caliente, dicha plancha térmica está protegida por una plancha metálica, compuesta de aluminio de baja calidad, de 0.5 cm de grosor. Este dispositivo de protección tiene a su vez una función de transmisión térmica, evitando posibles focos calientes de la propia placa y manteniendo una temperatura estable en toda la superficie de contacto entre la zona caliente y la muestra.

3.2 Requisitos de calibración.

La metodología expuesta en [3] establece los requisitos de calibración y estandarización para la creación de un sistema Hot-box, medición del rendimiento térmico de materiales de construcción y sistemas constructivos, en tres apartados principales. Tratando tanto el propio sistema (Hot-box assembly calibration), los componentes que lo forman (Sensor calibration) y los procedimientos a seguir con el fin de conseguir la fiabilidad requerida (Incertity calculation). Para el caso propuesto se establecen dichos requisitos uno a uno y en caso de desviación de los mismos se justifica la opción elegida.

Estos requisitos son seguidos para el desarrollo del presente proyecto en la medida posible, realizando sustanciales simplificaciones al sistema de medida e incrementando los rangos de incertidumbre. Aunque ciertas necesidades no puedan cumplirse con el sistema diseñado, principalmente los componentes que conforman la hot box y por lo tanto la certificación del propio elemento, se intenta mantener el cumplimiento del máximo de requerimientos posibles.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Las distintas partes que componen un Hot-box vienen definidas en la normativa y pueden ser observadas en la Ilustración 12, metering chamber en un lado de la muestra, climatic chamber en el lado opuesto, soporte de muestra y control ambiental cercano.

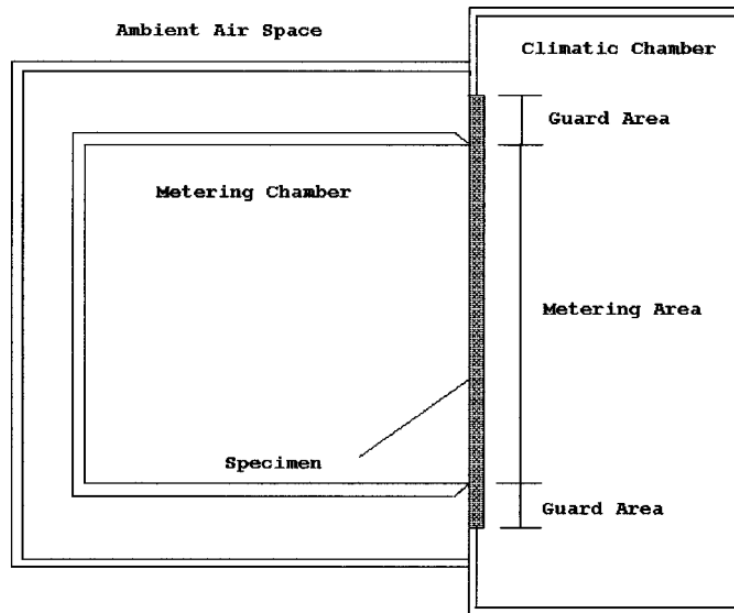


Ilustración 12. Partes Hot-box, imagen propiedad de ISO.

La zona denominada metering chamber, o zona caliente, es donde se influencia la muestra con el fin de mantener un flujo térmico constante. En el presente trabajo, consta del sistema de calefacción, plancha de homogeneización térmica y sistema de medición térmica. La principal desviación de la norma en este elemento se basa en las diferencias en restricciones del tamaño, tanto el tamaño mínimo de muestra como el tamaño mínimo de zona de medición. En la normativa se especifica la superficie de medición mínima como tres veces el ancho de muestra y como mínimo 1 m^2 , siendo el tamaño mínimo de muestra de 1.5 m . En el presente caso, y dado el propio tamaño reducido del instrumento diseñado, la zona de medición se limita a un máximo de 0.16 m^2 , siendo el tamaño de muestra máximo el mismo.

La zona climatic chamber es la principal diferencia entre el diseño presentado en la norma y el propuesto, donde se requiere un ambiente con temperatura estable y velocidad de viento muy reducida de manera que se pueda conseguir un estado estacionario completamente estable. Al contrario, el instrumento desarrollado no dispone de una cámara climática propia por lo que no tenemos un control exhaustivo de la temperatura externa, aunque sí se controla sustancialmente la velocidad de aire sobre la superficie de medición, por lo que no es posible conseguir un estado estacionario completo. Teniendo en cuenta tanto las variaciones térmicas producidas en dicho ambiente como las pérdidas asociadas a no disponer de dicho ambiente de control, el sistema aproxima la estabilidad energética de la muestra en función del flujo térmico que circula por la misma.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

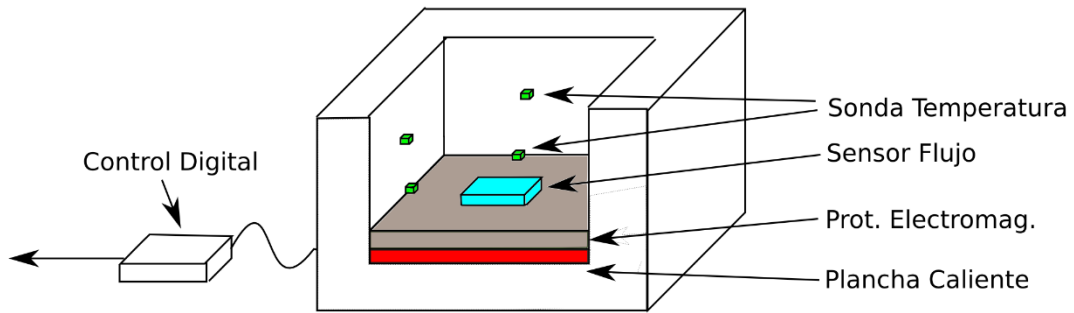


Ilustración 13. Partes Hot-box propuesta. Imagen propia.

El soporte de la muestra consiste en el elemento en contacto con la muestra y que minimiza las pérdidas limítrofes de la misma, pérdidas de flanqueo. En el caso que se propone disponemos de un material de compactación de la muestra, compuesto de poliestireno expandido en forma de bolas de 3mm con densidad 40 kg/m^3 , el cual nos permite a su vez la utilización de muestras relativamente pequeñas siempre que se mantenga una correcta superficie de medición, como mínimo de tres veces el grosor y con un amplio rango de geometrías exteriores.

Los componentes utilizados tanto para la medición de temperaturas (NTCLG100E2104JB) como flujo térmico (Hukseflux HFP01-05) se encuentran calibrados. Los cables, conectores y protecciones utilizadas siguen a su vez los requisitos de sección, material y tamaño requeridos por la norma. Por esto, se considera cubierto el segundo requisito de calibración del Hot-box propuesto.

Aunque existen numerosas modificaciones en forma y uso del propio elemento Hot-box, en relación con la descripción de la norma, se sigue conociendo las características físicas y del material que compone el sistema descrito. Si se conocen los detalles y materiales que componen la Hot-box, es posible establecer mediante cálculos correctivos las magnitudes de pérdidas producidas por la no idealidad del propio sistema.

3.3 Prevención de riesgos y limitaciones.

El sistema de caja caliente natural, aunque su utilización no es intrínsecamente peligrosa, tiene sus riesgos y las protecciones para evitar los mismos completamente estipulados. Durante los procesos de preparación y uso del instrumento existen tres focos de riesgo principales, el riesgo de quemadura e incendio debido al uso de una plancha caliente, el riesgo de asfixia debido al uso de perlas de poliestireno expandido (EPS) como material aislante y riesgo de atrapamiento al introducir y extraer las muestras del propio instrumento.

En el caso del riesgo por quemaduras o incendio debe establecerse los parámetros de control y elementos de protección necesarios para por una parte evitar que se presente un estado donde el riesgo sea posible y por otra definir sistemas de parada y control tanto físicos como programados. En el caso de las limitaciones que evitan los estados de riesgo debemos imponer unas limitaciones de funcionamiento térmico, donde estableciendo valores máximos de temperatura en el interior del instrumento evitamos las quemaduras de los operarios del mismo.

Las limitaciones de temperatura interna de la caja establecen como se ha comentado unos límites de temperaturas de trabajo, siendo definido dicho límite en función de las características de los elementos que componen la caja, que este caso al estar construida con poliestireno expandido con cobertura de poliuretano la temperatura límite de funcionamiento debe ser de 70°C como máximo, y un límite impuesto por el contacto de los operarios establecido en 70°C.

En control físico limitador de la temperatura realiza su función en caso de que el sistema de control produzca un estado erróneo o sea desconectado durante el proceso de un ensayo, para esto y como se explica en el diseño de la placa de control, el estado por defecto de la salida de alimentación de la plancha caliente siempre es apagado, por lo que es necesario un suministro constante en la base del transistor para mantener encendida la misma.



Ilustración 14. Cartelería de advertencia riesgo quemadura. Imagen propia.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Adicionalmente, se dispone señalización de advertencia con el fin de evitar contactos por parte de personal externo o que desconoce el estado de funcionamiento del instrumento, puede observarse en la Ilustración 14, así como de un pulsador de paro de doble acción con el que aseguramos la desconexión de todas las alimentaciones en caso de un mal funcionamiento o como respuesta rápida ante un accidente.

Para evitar el riesgo de asfixia, aunque externo a la construcción de la caja, se establece en la metodología de aplicación del ensayo de caja natural de plancha caliente el uso de equipos de protección individual (EPI), concretamente el uso de una mascarilla higiénica de celulosa.

El riesgo aplastamiento por parte de las muestras debe evitarse mediante un uso correcto por parte del operario, adicionalmente y debido a la carga máxima que es capaz de soportar la caja natural, se minimiza el impacto de dichos atrapamientos o aplastamientos. El peso de muestra máximo que es posible analizar en caja viene determinado al igual que la temperatura máxima de operación por los materiales que conforman la misma, aunque el poliuretano ofrece una resistencia a compresión aceptable se establece un límite de peso de muestra de 5kg.

Así pues, existen dos limitaciones impuestas con el fin de prevención, así como recomendaciones que se imponen sobre el protocolo de utilización del instrumento. Permitiendo evitar en la medida de lo posible y en caso de que se presenten paliar su efecto tanto de los riesgos de quemadura, atrapamiento y asfixia. Determinando por lo tanto los siguientes puntos en los datos técnicos finales de la caja:

| | Mínimo | Típica | Máximo |
|----------------------------------|--------|--------|-----------|
| Temperaturas de utilización (°C) | 15 | 30 | 70 |

Tabla 2. Temperaturas de trabajo caja natural de plancha caliente.

| | |
|---|----------------------------------|
| Carga máxima (Kg) | 5 |
| Material de relleno | Perla de poliestireno o similar* |
| * El relleno de material debe realizarse utilizando mascarillas higiénicas de celulosa | |

Tabla 3. Límites de trabajo y material fungible necesario.

3.4 Construcción del instrumento.

El esquema constructivo de la caja debe cumplimentar los requisitos térmicos, energéticos y monetarios impuestos por los principios de la metodología de caracterización propuesta. Por esto, se plantea la construcción del instrumento utilizando materiales con una muy alta resistencia térmica, dureza y resistencia suficiente para soportar muestras de diversas características y manteniendo un coste mínimo. Para esto se opta por materiales ligeros muy utilizados en construcción, con el consiguiente aprovechamiento o reutilización de material recuperado en obra, como es el poliestireno expandido (EPS).

Utilizar poliestireno expandido permite a su vez una fabricación rápida y de bajo coste, permitiendo extruir componentes o partes completas las cuales no necesitan un acabado posterior y pueden utilizarse directamente. Adicionalmente las partes que conforman la caja natural han sido recubiertas cobertura externa mediante poliuretano proyectado, como se observa en la Ilustración 15, lo cual por una parte otorga dureza y rigidez al cuerpo interno, y por otra protege dicho material interno de deformaciones o absorción de partículas externas o material de ensayo.



Ilustración 15. Sección pared caja natural, recubrimiento poliuretano y núcleo poliestireno expandido. Imagen propia.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Inicialmente se plantea un diseño modular desmontable, como se muestra en la Ilustración 16, esta tipología constructiva permite establecer un elemento fijo, la base del instrumento, donde se coloca la muestra y se aseguran los transductores tanto térmicos como de flujo y seguidamente los laterales de la caja se cierran y anclan permitiendo un posterior relleno de perlas de poliestireno en el hueco entre muestra y paredes laterales del instrumento. Esta caja inicial se diseñó con un área de medición de 0.2 x 0.2 m y unas dimensiones exteriores de 0.6 x 0.6 x 0.6 m, permitiendo así la caracterización de muestras con medidas inferiores a 0.2 x 0.2 x 0.4 m.

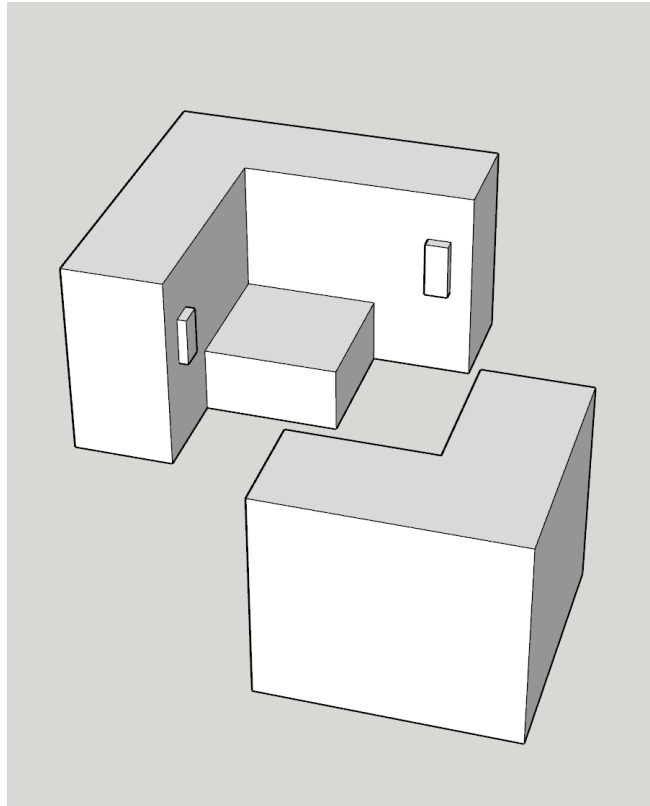


Ilustración 16. Caja Natural con configuración modular. Imagen propia.

Tras montar y probar dicha tipología se decide modificar la misma y sellar los laterales de manera que tanto base como laterales forman un único bloque, este cambio es motivado por la necesidad de minimizar las pérdidas térmicas por difusión de la muestra. Aunque se mejora la resistencia térmica la zona de contacto entre base y laterales, así como la de contacto lateral/lateral, mediante la utilización de fibra textil y velcro, las pérdidas que producen dichas juntas de unión son muy superior a las deseadas para un comportamiento aceptable del instrumento final.

Por lo que finalmente, el instrumento de caja natural de plancha caliente se conforma de un único bloque, como se observa en la Ilustración 17, donde la muestra debe disponerse por la cavidad superior y posteriormente se colocan los transductores y se rellenan los huecos laterales con perla de poliestireno.



Ilustración 17. Cuerpo Caja natural en proceso de fabricación. Imagen propia.

El instrumento final tiene un espesor de pared, tanto en la base como laterales, de 10cm y el sellado de los laterales se realiza con espuma de poliestireno de alta resistencia térmica evitando por lo tanto la presencia de un puente térmico. En la zona inferior de la caja se realiza una inserción por la que se disponen los cables tanto de alimentación como señal de los elementos electrónicos de la zona inferior, dicha inserción se sella con espuma de aislamiento tras anclar los cables que circulan por la misma en ambos extremos por lo que evitamos que el movimiento de los mismos degrade el sellado aislante dispuesto.

3.5 Presupuesto construcción y fungibles.

Como comentado en apartados anteriores el coste monetario tanto de construcción como de utilización del instrumento debe ser muy inferior al de instrumentos de caracterización similares basados en norma ISO o ASTM. Por una parte, el coste de fabricación se reduce sustancialmente al utilizar materiales y elementos de fabricación, sellantes y adherentes, utilizados en el propio ámbito de la construcción.

El cuerpo físico del instrumento, como se ha comentado anteriormente está compuesto de poliestireno expandido recubierto por endurecedor de base en poliuretano, materiales muy utilizados en construcción lo que incluso permite la reutilización de materiales de desecho o retales de trabajo para la construcción de la caja.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

El material de aislamiento y cobertura de muestras, perlas de poliestireno expandido como se observa en la Ilustración 17, es también un material utilizado en el ámbito de la construcción por lo que, como en el caso de los ensayos realizados en el presente trabajo, pueden utilizarse materiales sobrantes o recuperados, evitando así un coste de material fungible en la utilización del propio instrumento. A su vez este material, aunque siendo un material fungible es posible realizar múltiples ensayos manteniendo el mismo recubrimiento hasta un número de veces donde el calentamiento y enfriamiento del mismo produzca una reducción de propiedades o incremento de pérdidas energéticas.

Para determinar un punto aceptable donde la variación de propiedades del material de aislamiento lateral no tenga un impacto perceptible en el resultado del análisis final, se realizan múltiples ensayos del mismo material con el mismo material de relleno y tras los mismos es posible afirmar que aún después de 15 análisis no se aprecia un incremento térmico ni un flujo térmico superior a través del mismo. Aunque, las características físicas de las perlas si se ven repercutidas principalmente por el contacto con la muestra, percibiendo cierta absorción de partículas y coloreado de las mismas.

Por esto, se establece un rango de reutilización del material de aislamiento de muestra de **10 ensayos**, aunque se recomienda su renovación en caso de análisis de materiales que desprendan un número elevado de partículas o puedan modificar el comportamiento de las mismas por su forma o nivel de humedad interior.

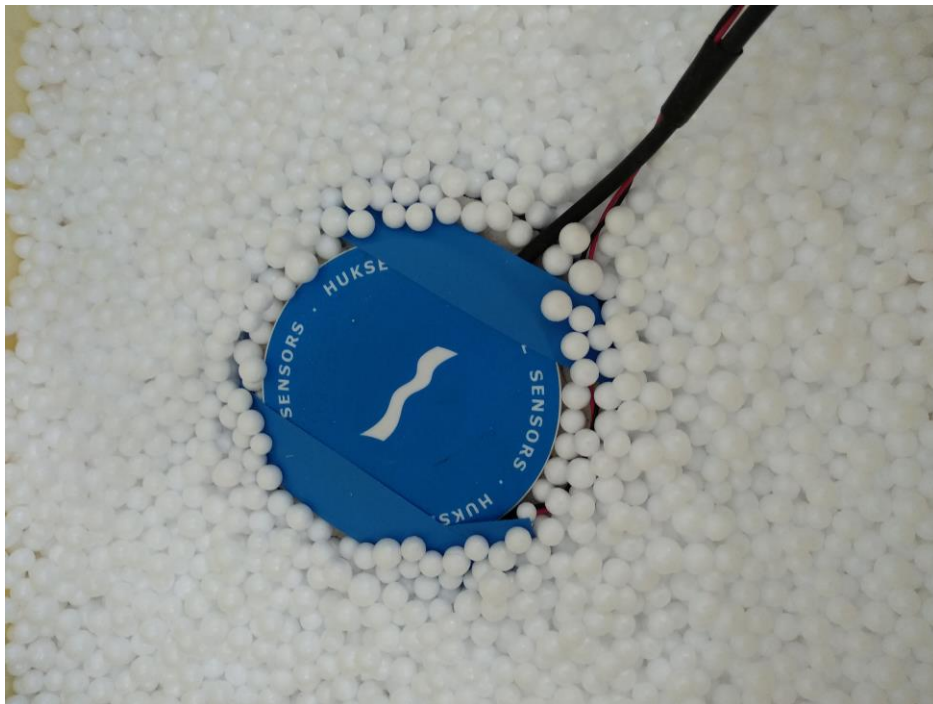


Ilustración 18. Detalle sensor HFP01-05 y aislamiento de perlas EPS. Imagen propia.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

El coste en electrónica, aunque elevado, es uno de los costes con más posibilidad de minimización cuando se pasa de un sistema prototipo a un sistema comercial de fabricación en serie. En el caso del control digital, y como comentado en apartados anteriores, se utiliza un sistema de hardware libre Arduino Mega 2560 R3 apoyado por un shield de prototipado microperforado con componentes discretos y cabezales de conexionado.

El coste de los transductores o sensores térmicos es uno de los más elevados, debido principalmente al alto impacto que tienen las características de los mismos sobre la fiabilidad final de los resultados obtenidos. Por una parte, los transductores térmicos utilizados son de un coste reducido, aunque su naturaleza analógica impone fuertes restricciones tanto en precisión como protección al ruido electromagnético. Por otra parte, el transductor de flujo térmico Hukseflux HFP01-05 observado en la Ilustración 18, es el elemento singular con un coste más elevado debido a la necesidad de establecer un certificado de la relación entre la tensión de salida y el flujo térmico presente en la zona de medición.



Ilustración 19. Resistencia plana sobre pcb, utilizada como elemento térmico y denominado plancha caliente. Imagen propia.

Finalmente existe un coste del sistema de plancha caliente, el cual utiliza elementos de calentamiento estándar en el ámbito de la fabricación de prototipos (impresoras 3D, rozamiento láser, etc.) como se observa en la Ilustración 19, con una superficie de trabajo de 22cmx22cm y permitiendo la utilización de múltiples planchas permitiendo la escalabilidad de la superficie de medición para muestras de tamaño mayor.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Aunque en el caso del presente trabajo el material fungible fue en su mayor parte material sobrante de obra, se realiza un análisis del coste material tanto del cuerpo del instrumento como de las perlas de poliestireno expandido utilizadas en el proceso de caracterización.

En el caso de un cuerpo de instrumento, compuesto de polietileno y recubrimiento de poliuretano endurecido, con un grosor de pared de 10cm y una zona de trabajo de dimensiones 25cmx25cm, empresas de venta al por menor presupuestan un coste aproximado de 39,4€. Aunque en la caja fabricada no existe un coste de elementos de sellado y adhesivos, dado que los mismos fueron recuperados de sobrantes de obra, el coste de venta al por menor de los mismos se presupuesta en 8,26€.

El coste del material de control electrónico, de control térmico y de sensorización es el que ocupa en relación una mayor partida del coste total. Por una parte, el sistema de control Arduino MEGA 2560 R3 tiene un coste comercial muy variable dependiendo del fabricante que oscila entre los 7,06€ de un fabricante sin marca asiático, hasta los 35,6€ de un fabricante de primera categoría europeo. Adicionalmente el coste tanto del shield de prototipado como los componentes discretos alcanzan un coste final de 23,72€.

En el caso de la plancha caliente la utilización de materiales estándar en otros ámbitos, así como material reutilizado, permite un ahorro significativo en el coste final, presupuestando un coste total para el sistema de control térmico de 18,75€. En el caso de no ser posible la reutilización de un sistema de alimentación eléctrica el coste final del sistema de plancha caliente alcanza un total de 49,82€

Finalmente, los equipos de sensorización donde como se ha comentado anteriormente los transductores térmicos tienen un coste muy reducido, de 1,43€ por elemento de medición, el cual contrasta sustancialmente con el coste del transductor de flujo térmico el cual tiene un precio de venta al por menor de 340,05€.

| Componentes de fabricación | Coste min. presupuestado | Coste max. presupuestado |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Cuerpo de instrumento | 39,4€ | 39,4€ |
| Electrónica de control | 30,78€ | 59,32€ |
| Sensorización | 341,48€ | 341,48€ |
| Control térmico | 18,75€ | 49,82€ |
| Otros | 0€ | 8,26€ |
| TOTAL | 430,41€ | 498,28€ |

Tabla 4. Coste material construcción caja natural de plancha caliente.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Para el caso del material fungible de operación, perlas de poliestireno expandido, empresas de venta al por menor presupuestan un coste de 19,95€ para un volumen de 125L de material, cantidad de material que permitiría 20 rellenos del instrumento sin muestra que con una previsión de reutilización y tamaño de muestra estándar permitiría aproximadamente unos 200 análisis o procesos de ensayo.

| Fungibles de utilización | Coste/Ensayo |
|------------------------------|--------------|
| Perla Poliestireno expandido | 0,1€ |

Tabla 5. Coste fungibles de utilización.

Por lo tanto y como se observa en la tabla superior, el coste de construcción de un instrumento de caracterización ‘caja natural de plancha caliente’ varía entre los 430,41€ y 498,28€, dependiendo de la capacidad de recuperación de materiales para su reutilización. El coste de operación del instrumento es en cualquier caso inferior a 0,1€, inferior a los costes de aplicación de las metodologías descritas en normativas ISO/ASTM donde el coste asociado a un ensayo, tanto en aclimatación como en aplicación, es muy superior [2].

Adicionalmente cabe destacar que el sensor de flujo térmico, componente con mayor impacto sobre el coste final de fabricación del instrumento, es compartido por el resto de metodologías descritas en este trabajo y permite diversas metodologías de caracterización y modelización, haciendo más favorable el elevado desembolso que conlleva su compra.

3.6 Adaptación y Adquisición de datos

3.6.1 Amplificación.

La correcta adquisición de los datos dispuestos por transductores debe realizarse dentro de unos rangos de propiedades impuestas por el conversor ADC, en este caso el conversor se encuentra integrado en el sistema Arduino Mega. La conversión de una señal analógica a digital impone unas limitaciones en el rango de tensiones de [0V-5V] y una corriente de entrada máxima de 150mA.

Los valores límite establecen la necesidad de un control tanto de la corriente máxima que puede recibir la entrada al conversor, como del rango de tensiones de admisión permitido. Para esto se dispone de un transistor mosfet en la entrada de adquisición de datos, el cual limita tanto el valor de tensión máxima de la señal y la corriente suministrada hacia dicha entrada.

A su vez, y con el fin de mejorar al máximo posible la resolución de la medida, a la vez que se minimiza el impacto del ruido electromagnético en las señales debemos establecer un proceso de amplificación y filtrado de las señales por etapas, que por una parte evite las posibles propagaciones de ruido y evite la introducción del mismo. Por esto, se plantea un proceso de cuatro etapas desde la recepción de la señal hasta su completa conversión a un valor digital, en dichas etapas se amplifica la señal hasta alcanzar el valor deseado de tensión a la vez que se

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

eliminan posibles ruidos tanto electromagnéticos inducidos por el foco térmico, como ruidos inducidos por la fuente de alimentación.

La primera etapa consistente en un proceso de preamplificación muy importante debido a la debilidad de la señal suministrada, especialmente susceptible a ruido electromagnético y atenuación por parte de otros elementos de adaptación. Esta preamplificación se realiza mediante un amplificador de instrumentación con una ganancia fija $G=10$, de manera que evitemos posibles variaciones de ganancia debido a los elementos de ajuste. Un amplificador de instrumentación, como el utilizado en esta etapa tiene como principal ventaja la resistencia a la inducción de ruido, pudiendo amplificar señales especialmente débiles y con una resolución adecuada.

Seguidamente se 'limpia' la señal recibida mediante un filtrado de altas frecuencias, donde eliminamos tanto posibles ruidos electromagnéticos inducidos en etapas previas, con especial consideración al ruido suministrado por fuentes de alimentación. A su vez se introduce una tensión de offset para conseguir que la señal de entrada, la cual puede tener valores de tensión negativa dependiendo de la dirección del flujo térmico medido por el transductor, siempre se encuentre en valores de tensión positiva. El valor del offset introducido es conocido $V_{offs}=2.5V$ y sitúa la señal de entrada preamplificada sobre el valor medio del rango de tensión con el que permite trabajar el ADC.

Finalmente, un proceso de postamplificación lleva la señal a un rango de salida óptimo para el aprovechamiento de la resolución del conversor ADC. Para esto se utiliza un amplificador seguidor de ganancia variable entre $G=150$ y $G=750$, lo cual permite trabajar con materiales de diferentes características y en todo momento se maximiza la precisión de la señal capturada.

Un esquema de todas las etapas del proceso de amplificación puede observarse en la Ilustración 20, donde el rango de tensiones de entrada se encuentra limitado entre $-1.65mV$ y $1.65mV$ como se demuestra a continuación y el rango de salida hacia el conversor ADC se encuentra en el rango máximo de $[0-5V]$.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

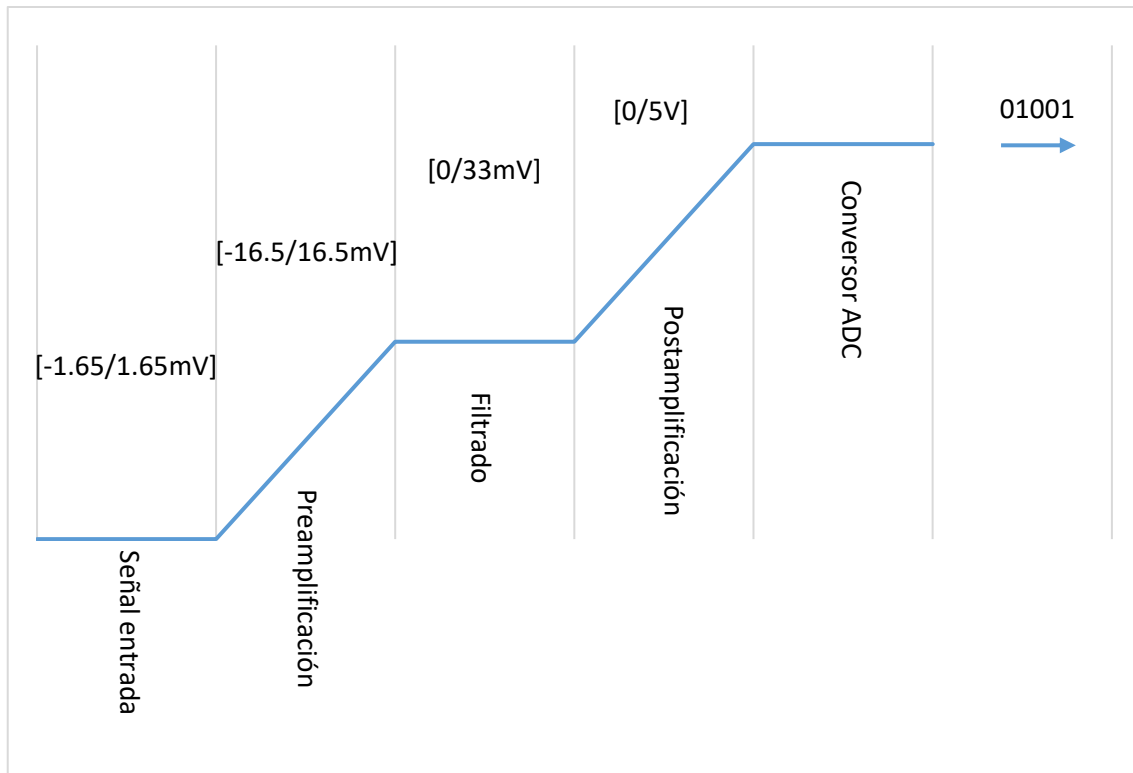


Ilustración 20. Esquema del tratamiento de la señal de flujo térmico capturada, desde el transductor hasta la obtención de un valor digital

Para la realización de las medidas necesarias que permiten la obtención del valor de resistencia térmica y como se establece en la ecuación 1, es necesario la obtención de los valores de temperatura tanto interior como exterior, así como el valor de flujo térmico que se transmite a través de la muestra. Para un correcto análisis de los transductores que capturan dichos valores es necesaria una adaptación de las señales a los requisitos técnicos del elemento de captura. Dicho elemento de captura está limitado a un rango de tensiones de [0V-5V] y una corriente de entrada máxima de 150 mA, ADC Arduino Mega.

Considerando que el valor final de resistencia térmica únicamente sufre pequeñas diferencias entre sus estados de TA, PC, TM y PE, se determina que el rango de capturas de temperaturas vendrá establecido por factores ambientales y una temperatura control cuyo rango es determinado por el instrumento.

En el caso de la captura del flujo térmico que atraviesa la muestra, se utiliza un transductor de flujo HFP-01 el cual tiene una sensibilidad de $50\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$, con el fin de maximizar la precisión de captura de dicho valor físico y considerando las limitaciones del sistema de captura es necesario la utilización de un sistema de amplificación variable, que no únicamente se adapte al flujo térmico de diferentes materiales, sino que se adapte a las diferentes fases de análisis a las que se somete la muestra. Así y considerando un rango de temperaturas ambientales limitado entre 5°C y 50°C obtenemos un rango mínimo para el sensor de flujo térmico determinado por el valor aproximado de resistencia térmica medio de los elementos aceptables para análisis por el propio experimento.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

La determinación de que muestras pueden ser analizadas por el instrumento debe considerarse desde fases iniciales de diseño, manteniendo un incremento térmico estable o dentro de unos márgenes, hace que las necesidades de la medida de flujo térmico varíen sustancialmente. Cuando se analiza un elemento con baja resistencia térmica, la amplificación no es tan exigente y nos permite analizar los estados TA, PC y PE de forma aceptable. Al mismo tiempo una amplificación más elevada durante el estado TM, nos permite obtener una medida mucho más precisa del valor final de resistencia térmica.

Por otra parte, cuando tratamos con muestras con una resistencia térmica baja o muy baja es necesario mantener una amplificación elevada durante todos los estados de la muestra. De esta manera conseguimos obtener valores representativos en cada una de las fases de medida, y a la vez la obtención de un valor preciso de resistencia térmica.

Debido a la naturaleza de los elementos muestras características a los que va dirigido la utilización del presente instrumento, materiales y elementos constructivos, podemos establecer un rango de resistencias térmicas a medir por el instrumento. Siguiendo los valores de resistencia térmica establecidos en [4], se establece un rango de transmitancia térmica entre 3 W/m*K para la peor resistencia térmica (mampostería y construcciones tradicionales) y una transmitancia térmica de 0.02 W/m*K para la mejor resistencia térmica (Aislamientos de espuma rígida de Poliuretano).

3.6.2 Adquisición.

Con el fin de establecer las necesidades del proceso de adquisición, conversión de los valores analógicos obtenidos de la amplificación a valores digitales utilizados en el sistema de control, debemos plantear dos requisitos fundamentales, la precisión de las medidas y la importancia temporal de las mismas. El requisito de precisión ha sido tratado extensamente durante el proceso de amplificación y dada la resolución de los transductores utilizados, no es un factor determinante en el proceso de adquisición de las señales analógicas.

Por otra parte, las características temporales de las señales a capturar no tienen unas restricciones importantes. Las temperaturas tanto exterior como interior del instrumento no presentan rápidas variaciones (inferiores a 0.5 °C/seg), por lo que no se necesitan altas frecuencias de muestreo. Y las medidas de flujo térmico, aunque más inestables que las de temperatura, no presentan grandes variaciones (inferiores a 50 W*m²/seg) por lo que frecuencias de muestreo bajas (10Hz - 20Hz) son capaces de representar el valor analógico con buena exactitud.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Otro importante factor temporal a considerar, aunque no tiene un impacto fundamental en el diseño del instrumento, es el tiempo de cambio de fase de la muestra. El tiempo necesario para que una muestra pase de un estado inicial TA (temperatura ambiente) a un segundo estado estable TM (temperatura de medida), determina los tiempos en que la muestra se encuentra en estado PC (periodo de calentamiento) y como se detalla en apartados consecuentes las capacidades de absorción térmica del elemento muestra. El mismo efecto se produce en el PE (periodo de enfriamiento), en el que el elemento muestra pasa de un estado TM a un estado final TA, y que como se comenta en siguientes apartados tienen considerable importancia en el ámbito constructivo al dar información del comportamiento del elemento constructivo en su utilización como masa térmica.

3.6.3 Calibración y Validación.

En los sistemas de instrumentación basados en la metodología de caja caliente calibrada, el sistema valida las medidas obtenidas mediante un balance térmico descrito en EN ISO 8990 y ASTM C1363-05. Dicho balance establece que la energía suministrada al sistema tanto para mantener las temperaturas de ambas cámaras estables (Q_{in}) como de los sistemas de movimiento de aire (Q_f), han de ser iguales al total de energías que se transmiten a través de la muestra (Q_s), las pérdidas entre la propia cámara caliente y el ambiente (Q_{chw}), el flujo térmico que atraviesa los elementos de soporte de la propia muestra (Q_{sp}), el flujo entre ambas cámaras por el propio elemento constructivo de la caja caliente ($Q_{sp,fl,cold}$), las pérdidas hacia el exterior producidas por los elementos de soporte ($Q_{sp,fl,out}$) y el flujo transmitido por la zona de contacto de la muestra hacia el ambiente frío (Q_{fl}). Así pues, el balance energético de la caja caliente calibrada se establece por la siguiente fórmula.

$$Q_{in} + Q_f = Q_s + Q_{chw} + Q_{sp} + Q_{fl} + Q_{sp,fl,cold} + Q_{sp,fl,out} (W) \quad (7)$$

En el caso de la metodología descrita en el presente artículo, sin embargo, y debido a las características de diseño del propio elemento, este balance energético se ve modificado. En este caso el balance energético de la caja caliente sigue la siguiente fórmula.

$$Q_{in} = Q_s + Q_{chw} + Q_{fl} (W) \quad (8)$$

Donde Q_{in} , es el flujo térmico suministrado por la plancha resistiva; Q_{chw} es la transferencia térmica entre la plancha térmica y el exterior que atraviesa el propio elemento caja caliente; Q_{fl} es la transferencia térmica de flanqueo de la muestra.

3.7 Resultados

Con el fin de obtener unos valores iniciales y de calibración, siguiendo el procedimiento establecido en [3], se realiza el análisis de transmitancia térmica de una muestra calibrada Sylvactis 110 SD, bloque constructivo de 1200x600x60 mm compuesto de fibras de madera rígida, con las siguientes características:

- Conductividad térmica 0.039 W/m*K
- Densidad 110 kg/m³
- Capacidad térmica másica 2000 J/kg*K

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

- Resistencia a compresión 40 kPa

Inicialmente se realizan cinco mediciones, expuestas a diferentes rangos de incremento térmico de 20°C a 60°C, para ajuste de amplificación y análisis de linealidad de medida en función del incremento térmico al que se encuentra expuesta la muestra. Obteniendo la Ilustración 21 de estas mediciones iniciales, en las que se puede observar cierta linealidad entre los valores de pérdida en función del rango térmico al que se expone una muestra, aunque fuera del rango establecido el valor de pérdidas crece rápidamente al acercarse al límite de funcionamiento de la caja, obteniendo un valor de pérdida lateral de 3.2W/m² en el caso de exposición a un diferencial térmico de 90°C.

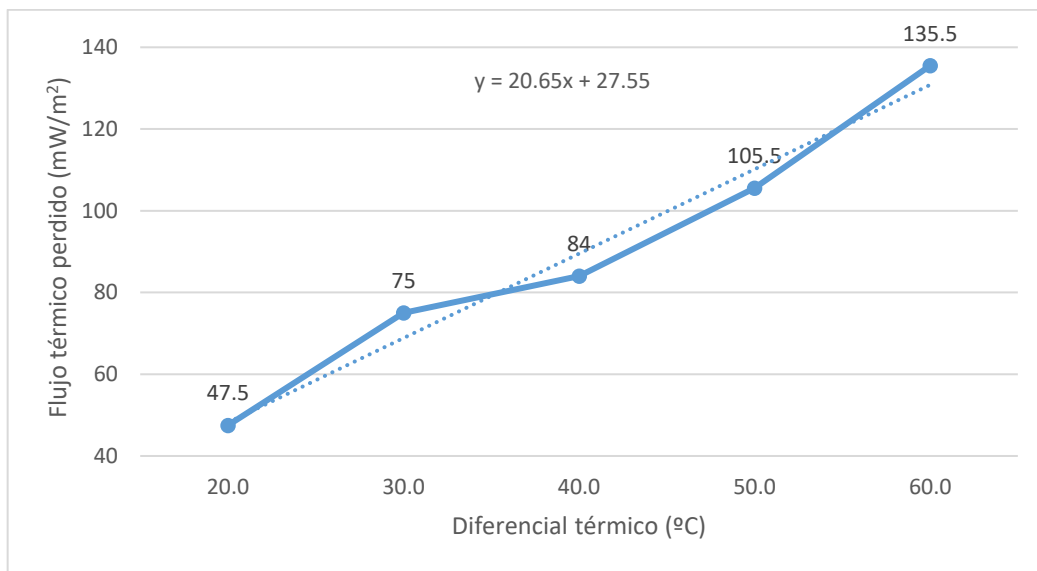


Ilustración 21. Pérdidas laterales a la caja natural de plancha caliente en función del rango térmico utilizado.

Por otra parte, se realiza una caracterización de un material conocido sobre caja natural y se comprueba la relación entre el flujo que atraviesa la muestra y el flujo térmico perdido por cada una de las caras de la caja natural. En la Tabla 6 se muestra el porcentaje de flujo perdido por la base del instrumento, así como por un lateral realizando medidas a diferentes alturas del mismo con el fin de caracterizar la diferente exposición al foco térmico cuando nos acercamos a la zona exterior de la muestra.

Siguiendo el patrón previsto, el mayor factor de pérdidas se encuentra en la cara inferior de la caja, donde el flujo térmico tiene un impacto directo, y en los laterales se observa una reducción del factor de pérdida cuando nos alejamos del foco térmico.

| ZONA | Pérdidas laterales |
|------------------|--------------------|
| Base | 3.62% |
| Lateral Inferior | 2.83% |
| Lateral Medio | 2.14% |
| Lateral Superior | 1.75% |

Tabla 6. Relación entre el flujo térmico medido en la muestra y el flujo térmico de pérdidas lateral, dependiendo de la exposición interior al foco térmico.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Una vez analizados tanto un material con transmitancia térmica conocida como las pérdidas de la propia caja natural, se lleva a cabo una batería de pruebas con materiales diversos de origen natural. Los materiales seleccionados para esta batería de pruebas son maderas con diferentes densidades, blanda y dura, una muestra de piedra caliza, una muestra de arenisca prensada (Marés) y una muestra de paja con la misma configuración que cuando se utiliza como elemento constructivo.

Estos materiales tan diversos han sido seleccionados como materiales con una alta variabilidad, determinados por técnicos del sector y a petición de COAAT Mallorca (Colegio oficial de aparejadores y arquitectos técnicos de Mallorca), utilizados en diversos procesos constructivos de viviendas. Dichos materiales consideran componentes constructivos, tanto en construcción tradicional nueva como en rehabilitación, sin una presencia de nuevos materiales constructivos debido a que los fabricantes de los mismos disponen, y hacen accesible, valores conocidos y de baja variabilidad de transmitancia térmica.

De los materiales seleccionados, conocemos otras características como densidad, dureza, humedad y por lo tanto tenemos unos valores aproximados de transmitancia térmica obtenidos a través de las tablas dispuestas en normativa [4]. Se analiza la transmitancia térmica de todos los elementos con un mismo incremento térmico de trabajo, de manera que se mantenga el rendimiento de la caja caliente y su linealidad en valores estables.

Los resultados del análisis de diferentes muestras de origen natural se muestran en la Tabla 7. A su vez, se puede observar la variación de dicha medida con los márgenes expuestos en normativa [4]. Con el fin de mejorar la fiabilidad de las medidas todas las muestras se exponen al mismo ambiente durante un periodo de estabilidad de 48h, ambiente con temperatura y humedad controlada. Por otra parte, los test se repiten 5 veces evitando en la medida de las posibles aberraciones y posibles variaciones en las medidas, debido tanto a carga térmica de las muestras como inercia térmica de los materiales analizados.

| Material | Densidad (kg/m ³) | HR (%) | R.Térmica medida (W/m*k) | R.Térmica norma (W/m*k) |
|---------------|-------------------------------|--------|--------------------------|-------------------------|
| Madera Blanda | 428.2 | 63 | 0.17 | 0.15 |
| Madera Dura | 500.1 | 61 | 0.192 | 0.23 |
| Bala de paja | 110 | 45 | 0.056 | 0.06 |
| Piedra caliza | 2530 | 5 | 1.773 | 1.7 |
| Marés | 2326 | 32 | 1.515 | 1.5 |

Tabla 7. Resultados análisis materiales de origen natural.

Estos análisis se han realizado en condiciones ambientales, y de muestra, conocidas y estables. Se analizó la temperatura y humedad de muestra previas a la realización del ensayo, hasta obtener un estado estable de muestra en el ambiente de laboratorio, y se realizaron múltiples ciclos de testeo con el fin de asegurar valores obtenidos.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Dicho procedimiento se aleja de la premisa de funcionamiento de la caja propuesta (muestras rápidas, baratas y sin necesidad de una preparación previa prolongada), por lo que se realiza una tercera batería de testeo con muestras obtenidas directamente de una obra en ejecución. Dichas muestras comparten materiales con muestras anteriormente analizadas y el ejecutor de la obra dispone de un valor aproximado de transmitancia térmica de las mismas, por lo que podemos realizar una comparativa directa del valor obtenido.

La muestra objetivo analizada consiste en una combinación de un aislante de origen natural, viruta de madera compactada, y un aglomerante que también proviene de origen natural, barro compactado. Siendo un material directamente utilizado en obra, la muestra no dispone de una geometría idónea y ha sido expuesta a un ambiente cálido y húmedo previamente a la realización del test. En la Ilustración 22 es posible observar el proceso constructivo en el que se coloca el aislante de viruta de madera compactada, según procedimiento establecido por fabricante.



Ilustración 22. Muestra objetivo de viruta de madera compactada, con características y respuesta térmica conocida. Imagen propiedad de Socyr.

En la Tabla 8 podemos observar los resultados obtenidos del análisis de las muestras obtenidas directamente de obra, así como una comparativa directa con los valores de trabajo del equipo técnico para dichas muestras. Es posible observar por una parte una humedad relativa de muestra mucho mayor a la ambiental del laboratorio (HR 55%), debido a la continuidad del proceso de secado del componente.

| Material | Densidad (kg/m ³) | HR (%) | R. Térmica medida (W/m*k) | R. Térmica conocida (W/m*k) |
|--|-------------------------------|--------|---------------------------|-----------------------------|
| Compuesto de viruta de madera compactada | 45 | 68 | 0.145 | 0.132 |

Tabla 8. Resultado análisis material de características térmicas conocidas.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Las resistencias térmicas obtenidas, aun cuando tenemos un material con condiciones de ensayo no estables (humedad elevada), se aproximan notablemente a los valores conocidos de la muestra (diferencia < 9%) y por consiguiente es posible determinar que las muestras obtenidas mediante la utilización de la caja natural de plancha caliente, son representativas y proporcionan seguridad y fiabilidad en el uso de materiales con características térmicas no conocidas con detalle, como en el caso de materiales naturales.

3.8 Uso y aplicación de la instrumentación desarrollada

3.8.1 Innovación material de aislamiento

La utilización de la caja natural de plancha caliente por parte del grupo de construcciones arquitectónicas tiene tanto un carácter innovador como divulgativo importante. Por una parte disponer de un instrumento de caracterización térmica capaz de aportar valores de mejora de manera rápida y barata, tiene como efecto un incremento sustancial en la generación de nuevos prototipos de aislamiento, por otra parte la facilidad de obtención de valores aproximados de resistencia térmica de materiales diversos permite establecer la respuesta térmica de sistemas constructivos teóricos o desconocidos.

En concreto, la utilización de la caja natural de plancha caliente tenía como aplicación determinar las características reales de materiales, que aunque ampliamente utilizados en construcción no tiene valores establecidos o sus valores son generales y no representativos de las características térmicas reales del material finalmente utilizado. Materiales donde aun conociendo aproximadamente su respuesta térmica no tenemos detalles de desviaciones en sus características, ya sea por localidad de origen o respuesta térmica ante diferentes cargas térmicas.

Las construcciones que utilizan materiales con características térmicas no certificadas, cumplimentan normativas y legislaciones de características mínimas de aislamiento apoyándose en valores preestablecidos que poco o nada reflejan las diferentes variantes del material, como pueden ser porosidad o resistencia térmica.



Ilustración 23. Muestras para ensayo en caja natural de plancha caliente de marés proveniente de canteras mallorquinas. Imagen propia.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Por ejemplo, en Mallorca existen multitud de canteras de marés las cuales suministran material con características muy diferenciadas, no tan solo en color o resistencia sino en la resistencia térmica o densidad del propio material, lo cual tiene un importante efecto sobre la respuesta energética del mismo, un ejemplo de las diferentes características de marés de Mallorca puede observarse en la Ilustración 23.

Por esto, la caja natural de plancha caliente tiene un impacto sustancial es en la categorización de las diferentes variaciones de estos elementos, así como otros materiales tradicionales utilizados en construcción, tales como piedra caliza o madera.

Por otra parte, existen múltiples mejoras de materiales de construcción que teóricamente ofrecen un ahorro energético sobre soluciones aplicadas en la actualidad, aunque el coste de ensayo así como la rigurosidad y tiempo necesario para realizarlos conlleva la necesidad de establecer previamente las soluciones más viables o investigar únicamente aquellas que ya han sido probadas.

Esta criba de posibilidades limita sustancialmente la generación de nuevos elementos de aislamiento o sistemas de mejora de los elementos actuales, y un sistema como el de caja natural de plancha caliente puede ayudar a establecer elementos candidatos para un análisis más exhaustivo o incluso descartar un gran número de ellos, gracias al bajo coste a aplicación y la rapidez de obtención de resultados.

Un foco importante en el descubrimiento de nuevos materiales de aislamiento se centra en la interacción entre un material “base”, como son los morteros de cal o el cemento, una vez se mezclan combinándolos con un material o elemento “aditivo”. Dichos aditivos varían en un amplio abanico de posibilidades desde elementos de desecho, reciclados o vegetales que mejoran la eficiencia energética del material resultado, hasta elementos químicos que mejoran la respuesta térmica de forma dinámica en respuesta a las necesidades de aislamiento.

Los sistemas constructivos utilizando elementos aditivos naturales se encuentra fuertemente presente en la construcción tradicional mediterránea donde, aunque sin valores concreto de la mejora aportada o de las ventajas de utilización ante otras posibilidades, estos materiales han sido utilizados típicamente. Ejemplos de materiales naturales utilizados para la mejora del aislamiento térmico de cerramientos son el hueso de oliva [5], corcho [6] o paja [7].

Esta combinación de un material fibroso, como es el tallo de un cereal o una planta, con una base de barro o lodo tiene como ventaja directa la mejora en resistencia térmica del material mezcla sin un fuerte impacto en las características de aplicación del material base, no empeorando las capacidades de absorción, adherencia o resistencia. En la siguiente Ilustración 24 se puede observar la muestra barro-paja utilizada para la caracterización del material en la caja natural de plancha caliente.



Ilustración 24. Muestra para ensayo en caja natural de plancha caliente de barro-paja. Imagen propia.

Otro ejemplo de utilización de materiales aditivos naturales, aunque en este caso de origen animal y no vegetal como en el caso del barro-paja, es la utilización del hueso de sepia. Dicha parte del animal permite variar la flotabilidad del mismo debido a su porosidad la cual se utiliza rellenando de gas o líquido ajustando profundidad a la que se desplaza la sepia. Es un hueso dispuesto en la zona interna del animal, compuesto principalmente por carbonato de calcio y que una vez seco tiene una densidad muy baja para la resistencia mecánica que dispone.

Estas características hacen del hueso de sepia un aditivo muy atractivo para la mejora de la resistencia térmica de recubrimientos o paramentos exteriores. Una muestra de un material de construcción con base de mortero de cal y un aditivo de hueso de sepia triturada ha sido analizada mediante el uso de caja natural de plancha caliente, en concreto se ha realizado una comparativa entre la muestra con aditivo y una muestra de mortero de cal referencia sin ningún tipo de añadido.

| Muestra | Valores U | L muestra | Valor λ |
|------------|-----------|-----------|-----------------|
| Referencia | 9.25 | 0.114 | 1.0545 |
| Sepia | 6.4552 | 0.114 | 0.735893 |

Tabla 9. Resultados análisis Caja natural de plancha caliente.

La tabla anterior muestra los resultados del análisis de transmitancia térmica (Valor U) y la conductividad térmica (Valor λ). Los resultados obtenidos demuestran las mejoras que el aditivo de hueso de sepia como elemento de mejora de la resistencia térmica de un material proporciona. Con un porcentaje de aditivo del 20% como es el caso que nos ocupa, la muestra con aditivo de hueso de sepia tiene una mejora de la transmitancia de un 30%, a continuación se puede observar una imagen, Ilustración 25, de la muestra de hueso de sepia así como un detalle de la superficie de la misma.

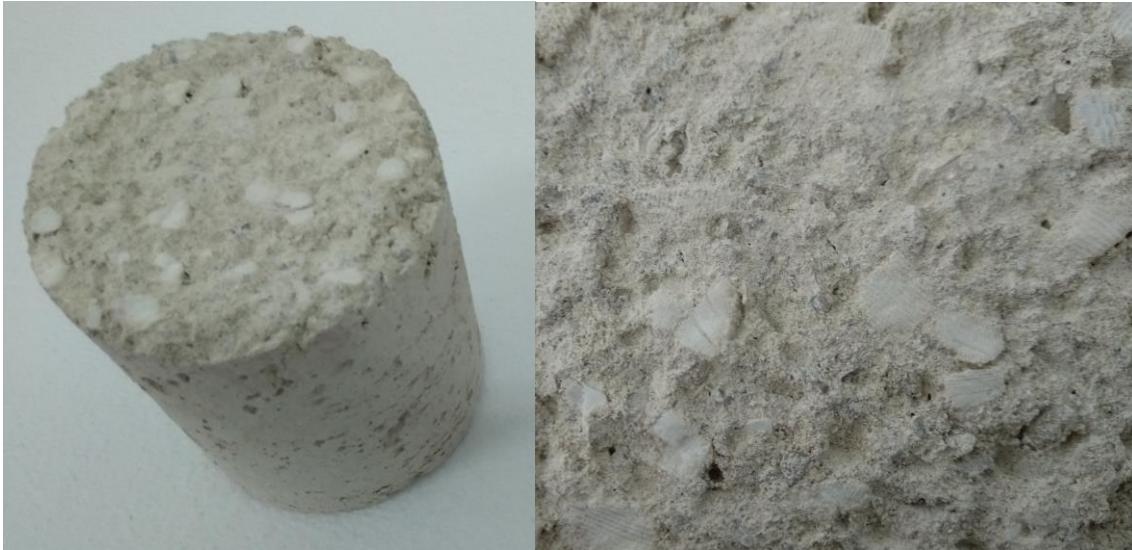


Ilustración 25. Muestra para ensayo en caja natural de plancha caliente de mortero de cal con aditivo de hueso de sepia. Imagen propia.

Aunque el análisis de las propiedades térmicas de sistemas constructivos con aditivos naturales, como los utilizados en construcción tradicional, tiene un importante impacto en la toma de decisiones de carácter energético, la mayor parte de estos están centrados en la adición de un componente con una alta resistencia térmica a una base de material de construcción. Otro apartado importante en el campo de la mejora en eficiencia energética se centra en la utilización de transformaciones o efectos transitorios del elemento añadido como aditivo, como son las interacciones de cambio de fase o el efecto de la inercia térmica.

Un ejemplo de estas prácticas las podemos encontrar en el estudio realizado en el artículo “Overheating mitigation strategies analysis: a mediterranean case study” [8] donde se explica el proceso por el cual la adición de Óxido de hierro (Fe_2O_3) a una base de mortero de cal, tiene un impacto sustancial en la mejora del aislamiento térmico. En la Ilustración 26 se observa una muestra de la combinación de mortero de cal y óxido de hierro, con una proporción de aditivo del 20%.



Ilustración 26. Muestra mortero de cal con aditivo Fe_2O_3 del 20%. Imagen propia.

En este caso, aun cuando el aditivo no presenta una mejora sustancial en la resistencia térmica el efecto que produce el mismo sobre la mezcla conlleva una mejoría sobre el resultado final de la muestra. Los efectos que hacen mejorar la resistencia térmica del mortero de cal al añadirle un aditivo de óxido de hierro se basan en tres fenómenos: el incremento de la porosidad, la disminución de la compactación y la reducción de la conducción entre partículas del componente final.

La aplicación de la instrumentación desarrollada, en concreto la caja natural de plancha caliente, no únicamente permite determinar el valor de transmitancia térmica de una muestra sino que como se ha comentado anteriormente, es posible establecer el efecto que dicho aditivo tiene sobre el valor final de la inercia térmica del material resultante. Adicionalmente, un análisis de características térmicas rápido y barato permite determinar el efecto que tiene la variación en la proporción de aditivo sobre el resultado de respuesta térmica final.

Se analizan múltiples muestras con proporciones de aditivo entre 5 y 30 %, el valor de conductividad térmica de dichas muestras se compara con el valor teórico que debería tener la muestra final si la interacción entre aditivo y base fuese neutra y las características térmicas fueran una relación entre las propiedades de cada elemento por si solo y el porcentaje de aislamiento.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

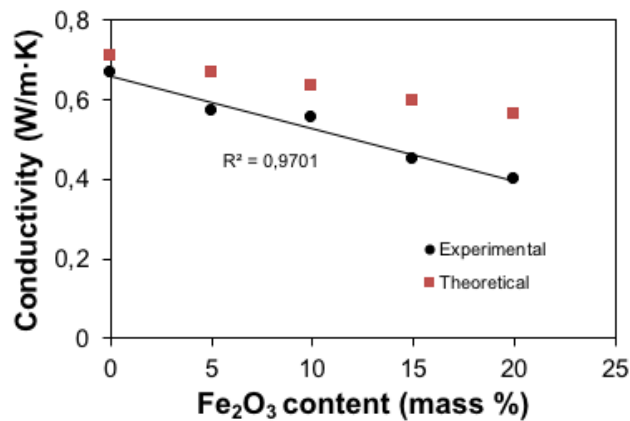


Ilustración 27. Relación entre el porcentaje de aditivo y conductividad de la muestra.

Como se observa en la Ilustración 27, la conductividad térmica de las muestras se reduce más rápidamente que la teórica. Sin embargo, dicha mejora del aislamiento se reduce sustancialmente al alcanzar una proporción de Fe₂O₃ superior al 20%, estableciendo un valor de saturación de la muestra y una característica adicional no determinable en el caso de aplicación de instrumentación típica de caracterización térmica.

Todos estos ensayos/análisis ponen de manifiesto las ventajas de utilización de un sistema de caracterización térmica sencillo, de bajo coste y con una rápida aplicación. No únicamente permitiendo la obtención de valores aproximados de transmitancia térmica de diferentes materiales, sino aportando valor añadido a dichas mediciones tanto por la posibilidad de repetir el análisis múltiple veces o en múltiples muestras, como la posibilidad de analizar valores de inercia térmica de materiales.

3.8.2 Proyecto Reusing Posidonia

3.8.2.1 Planteamiento

Un claro ejemplo de aplicación de las metodologías desarrolladas, así como utilización de los sistemas de caracterización desarrollados, es el proyecto Reusing Posidonia. Proyecto enmarcado dentro de la financiación europea “Environment LIFE programme”, en el cual se diseña, construye y caracteriza un edificio plurifamiliar por parte del IBAVI (Instituto Balear de la vivienda) donde la utilización de materiales renovables, de bajo impacto ambiental y de cercanía a la zona de implantación es básica.

Dentro del proyecto Reusing Posidonia se realizan múltiples acciones tanto en etapas iniciales de diseño del edificio, caracterización de posibles materiales, validación de soluciones constructivas, así como desarrollo de mejoras de las mismas. Como en etapas finales, una vez construido y ocupado el edificio, caracterizando tanto el aislamiento final obtenido como la validez de diferentes propuestas de aireación y climatización.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

En etapas iniciales, se realizaron múltiples caracterizaciones y ensayos con el fin de determinar que materiales naturales presentes en la zona serían idóneos para su utilización como material constructivo. Adicionalmente, se analizaron diferentes soluciones constructivas o esquemas de composición característicos de la zona con el fin de determinar su idoneidad en la aplicación de un edificio de nueva construcción.



Ilustración 28. Posidonia Oceánica. Imagen propiedad de wikimedia.

Las muestras iniciales suministradas por el IBAVI intentaban determinar la idoneidad de utilización de diferentes materiales de cercanía para una variedad de soluciones constructivas planteadas (cubiertas, recubrimientos de fachada, etc.), las muestras se componían de materiales tales como posidonia oceánica, Ilustración 28, planta acuática natural del mediterráneo la cual crece en forma alargada y una vez seca sus fibras son utilizadas tanto en construcción como material artesanal, compactada a diferentes densidades y distintos elementos de confinamiento, como bloques de tierra compactada.

Con el fin de determinar que materiales serían de aplicación en un sistema constructivo moderno se realizan ensayos de comportamiento de diferentes materiales naturales, como es la posidonia oceánica seca sin procesado físico (no ha sido trozada o triturada) y un bloque compuesto de tierra ligera de la zona, el cual ha sido compactado formando un bloque de tierra compactado (BTC).

En la realización de estos ensayos iniciales se monitoriza la temperatura y humedad de una muestra del material natural con el fin de determinar la respuesta de dichos materiales a un ambiente no controlado y expuesto a efectos adversos. En la Ilustración 29 podemos observar el sensor y elemento de transmisión de datos utilizados, así como el proceso de pesado y encapsulado de la posidonia oceánica seca utilizada.



Ilustración 29. Sensor térmico introducido en muestra de posidonia oceánica compactada. Imagen propia.

Durante este proceso de caracterización básico se determina la importancia de la compactación del material durante el proceso de secado, así como la dificultad de alcanzar las densidades planteadas por el proyecto preliminar. Inicialmente se plantea la utilización de posidonia oceánica con una densidad de 300kg/m^3 , y se impone la necesidad de conseguir la compactación en obra mediante procesos manuales.

Aunque una compactación manual de un material natural no permite una reproducibilidad exacta, por lo que no dispondremos de la densidad de 300kg/m^3 en la realidad, mediante el pesado del material previo a su disposición es posible conseguir densidades aproximadas en obra y sin la necesidad de utilizar medios mecánicos ni sistemas precompactados en obra, lo cual era una premisa del equipo técnico constructivo.

Mediante la realización de estos ensayos se determina que en elementos constructivos de gran tamaño es difícil alcanzar la densidad objetivo de 300kg/m^3 por medios manuales, aun cuando se utilizan herramientas tradicionales como tejas o botellas. La densidad alcanzada en una muestra de ensayo de dimensiones $2 \times 2\text{m}$ con una compactación manual y anclado con cuatro pernos perimetrales no supera los 215kg/m^3 , a partir de esta densidad se observa deformaciones o es imposible la realización del proceso.

Adicionalmente se confirma la posibilidad de utilización de la posidonia oceánica en un sistema constructivo como elemento aislante, debido tanto a su rapidez de secado, como a su sencillez de almacenaje, transporte y aplicación.

3.8.2.2 Ensayos caja natural de plancha caliente

Una vez establecido el material natural a utilizar, posidonia oceánica, y conocido el impacto de la densidad en la utilización del mismo como material aislante en un elemento constructivo, como el que se muestra en la Ilustración 30, se analizan las características de conductividad térmica del material a diversas densidades.

Desde una densidad de compactación ligera (150kg/m^3), compactaciones manuales sencillas únicamente utilizando un prensado manual por parte del operario (185kg/m^3), sistemas de prensado manual de alto esfuerzo donde el operario compacta el material utilizando herramientas tradicionales (200kg/m^3) y sistemas de compactado manual donde múltiples operarios utilizan su peso corporal y herramientas para conseguir una mejor compactación (215kg/m^3), finalmente se comparan estos resultados con un sistema de compactación mecánico mediante prensa hidráulica (300kg/m^3).

| Density (kg/m^3) | Thermal conductivity ($\text{W/m}^*\text{K}$) |
|--------------------------------|---|
| 150 | 0.049 |
| 185 | 0.044 |
| 200 | 0.043 |
| 215 | 0.041 |
| 250 | 0.039 |

Tabla 10. Valores de conductividad térmica Posidonia Oceánica a diversas densidades.

La Tabla 10 muestra los resultados obtenidos de la aplicación de caja natural de plancha caliente a muestras de posidonia oceánica a diversas densidades. Observando como la utilización de sistemas mecánicos, los cuales implican un mayor coste de utilización, no tienen un impacto significativo sobre el resultado final de transmitancia térmica. Adicionalmente se determina la idoneidad de utilización de sistema de prensado manual utilizando herramientas de compactación tradicional, como son tejas o botellas.

Una vez determinado el uso de posidonia oceánica como elemento natural y el rango de densidades aplicable en el caso del presente proyecto, el IBAVI establece dos características básicas para la aplicación del material propuesto y en las condiciones planteadas de densidad, y por lo tanto cumplir la reglamentación constructiva aplicable. Las características demandadas son transmitancia térmica y limitaciones físicas de las muestras, en el caso de transmitancia la aplicación de la metodología de caja natural de plancha caliente obtiene los valores, aunque en el caso de las limitaciones físicas es necesario soporte externo adecuado a las necesidades planteadas, el cual se lleva a cabo por un laboratorio externo al grupo.

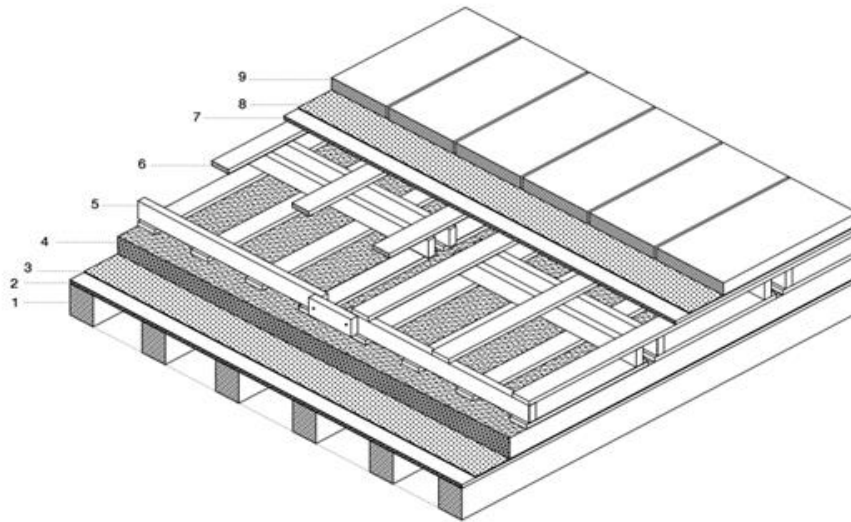


Ilustración 30. Detalle sección de las capas que componen el sistema constructivo de cubierta.

Aplicando la metodología de caja natural planteada en el presente trabajo es posible determinar la transmitancia térmica del elemento constructivo al completo y así determinar el valor final de transmitancia aplicable al mismo, el cual está limitado por la normativa de ahorro energético dispuesta en el CTE. El sistema constructivo analizado está compuesto por múltiples capas, como se puede observar en la Ilustración 30, donde comenzando desde la zona interior y en dirección a la zona expuesta al exterior tenemos:

1. Vigas GL-24 laminadas de madera
2. Tablón OSB/3
3. Barrera de vapor Riwega
4. Capa de cemento aligerado 250kg/m^3
5. Capa aislamiento mediante Posidonia Oceánica
6. Tablillas de madera $5 \times 10\text{cm}$
7. Tablón OSB/3
8. Capa impermeable EPDM y geotextil
9. Piedra recubrimiento exterior

Aunque debido al espesor del sistema constructivo, el cual excede el límite impuesto por el instrumento caja natural de plancha caliente construido en el presente trabajo, la capa de recubrimiento exterior de piedra (marés de “Ca’s Busso”) no se analiza junto al resto de capas, sino que se realiza en un ensayo posterior y la transmitancia final del sistema se obtiene mediante la suma de resistencias térmicas.

El análisis de la solución constructiva planteada, una vez analizados todos sus elementos, da como resultado una transmitancia final de $0.2164 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, esta transmitancia final del sistema constructivo es inferior al límite que se impone el proyecto MAIN y el cual es más reducido aún del que dispone la normativa de construcción en materia de ahorro energético.

El proceso de determinación de la densidad de aplicación de la Posidonia Oceánica, así como los pasos y procedimientos seguidos para la determinación del valor de transmitancia final del sistema constructivo, pueden ser observados en el artículo adjunto en el Anejo 2 [8].

3.8.2.3 Validación insitu de resultados

Una vez la edificación objeto del proyecto MAIN finaliza su construcción, y los usuarios de las viviendas hacen uso de las mismas, se decide implementar un sistema de medida que determine la idoneidad del proceso constructivo realizado para la implementación del elemento de cubierta previamente estudiado.

Este análisis no pretende establecer un valor de transmitancia térmica o inercia térmica del elemento construido, sino que el IBAVI promueve una campaña de medidas con el fin de establecer correctos valores de confort térmico en el interior de las viviendas y establecer procedimientos preventivos ante deficiencias encontradas. A su vez, el análisis de funcionamiento del elemento de aislamiento térmico permite al IBAVI, entidad de carácter público, establecer unos márgenes de funcionamiento y consumo aceptables para cada una de las viviendas arrendadas en función de las necesidades térmicas establecidas.

Estas razones, así como la necesidad de realizar medidas durante un periodo de meses en el interior de viviendas ocupadas, limitan el uso de instrumentación con un alto coste monetario o que necesite control por parte del equipo que realiza el ensayo. Por esto, se define un sistema de monitorización basado en la metodología de caracterización insitu, aunque en el presente caso no se dispone de valores de transmitancia térmica. Por lo que los sistemas de sensorización utilizados están compuestos únicamente de transductores térmicos tanto ambientales como superficiales, así como un análisis de la humedad relativa tanto en el interior como exterior de las viviendas.

Se plantea una colocación de sensores tal que todas las orientaciones, tanto exteriores como interiores, sean analizadas y simultáneamente se replican los puntos de medida en las diversas plantas del edificio, disponiendo sensores adicionales en el análisis de cubierta. Donde establecemos sensores térmicos ambientales, transductores térmicos superficiales y transductores de humedad relativa, en una vivienda con orientación de fachada principal a cada una de las dos calles a las que se expone el edificio, así como una vivienda de las que comparten un muro con edificio colindante en cada una de estas orientaciones.

Adicionalmente y con el fin de eliminar el efecto de la selección de una vivienda en planta baja o primera planta se selecciona para cada uno de los cuatro casos establecidos una vivienda en cada planta, realizando finalmente un análisis en un total de ocho viviendas.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

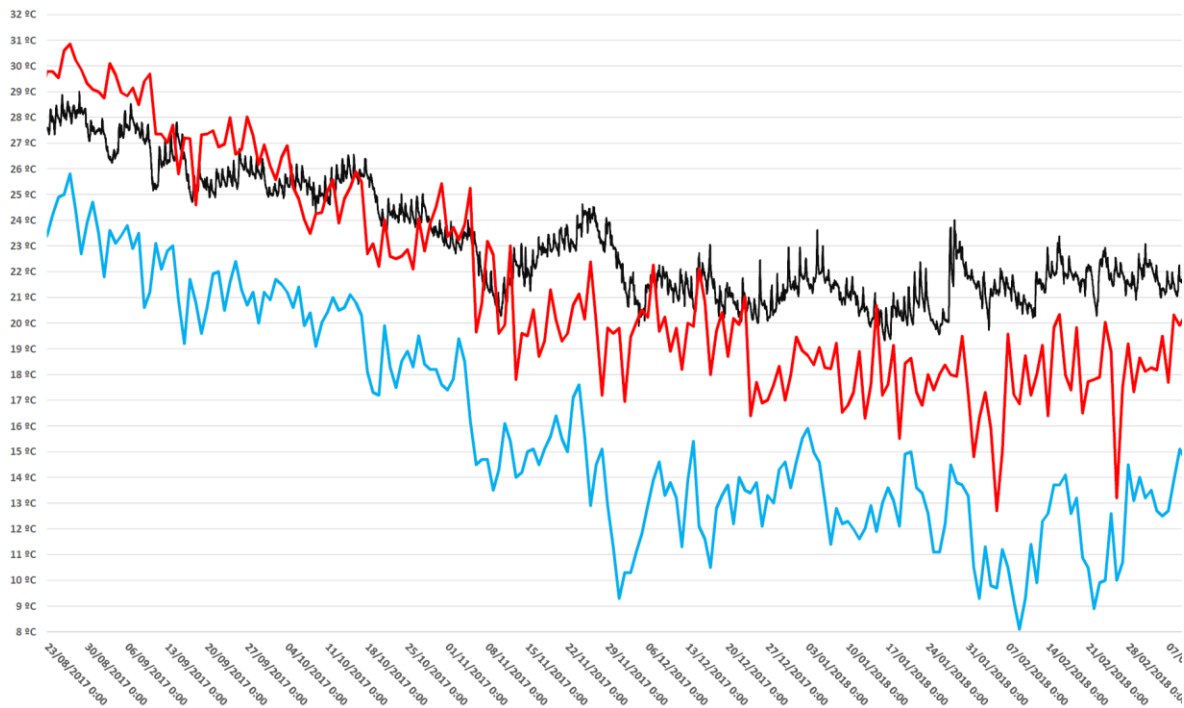


Ilustración 31. Resultados vivienda orientación de fachada sur. En negro la temperatura superficial interior a la vivienda, en rojo la temperatura del cerramiento en la superficie exterior y en azul la temperatura ambiental exterior.

Una vez realizada una monitorización continua de las variables, se analizan los resultados obtenidos constatando los datos con un cuestionario de los usuarios de las viviendas con el fin de determinar posibles desviaciones o condiciones de uso. La Ilustración 31, muestra las condiciones de una vivienda con orientación sur donde se recibe una buena cantidad de luz solar y el uso de la propia vivienda por parte del usuario se determina como adecuada, ventilación correcta y uso de calefacción moderado. Estos datos establecen el mejor caso posible dentro del edificio de viviendas y a su vez confirma el buen resultado de la utilización de Posidonia Oceánica.

Por el contrario, encontramos dos viviendas como casos extremos de uso inadecuado, una de ellas donde se realiza una ventilación excesiva y no se utiliza en ningún momento el sistema de calefacción, por lo que la temperatura ambiental interior, como se observa en la Ilustración 32, no está prácticamente atenuada. La otra vivienda donde se realiza un mal uso, es un domicilio donde la ventilación es muy deficiente y el sistema de calefacción se utiliza en exceso, esto provoca un incremento sustancial de la temperatura y humedad interior, muy por encima de los umbrales de confort y dentro de márgenes de insalubridad, llegando a humedades medias interiores de hasta el 89%.

Estos datos y un análisis de los mismos se entregan al IBAVI, el cual contrasta con los consumos de gas de calefacción las premisas dispuestas, y facilita la implantación de medidas correctoras de ahorro energético y mejora del confort interior.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

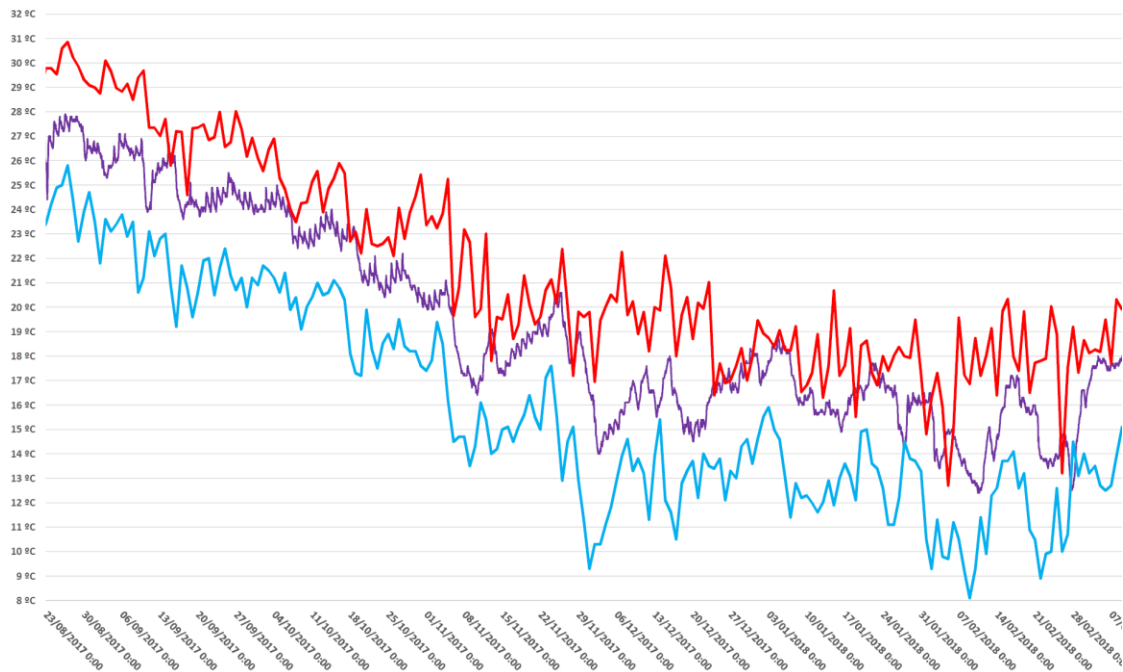


Ilustración 32. Resultados vivienda con uso inadecuado de los sistemas de ventilación y climatización. En morado la temperatura superficial interior a la vivienda, en rojo la temperatura del cerramiento en la superficie exterior y en azul la temperatura ambiental exterior.

Referencias

- [1] Ministerio de Fomento, “Documento Básico HE - Ahorro de energía”, Ministerio de Fomento, 2016.
- [2] ISO. ISO 8302:1991, “Thermal insulation — Determination of steady-state thermal resistance and related properties — Guarded hot plate apparatus”, International Organization for Standardization, 1991. <https://www.iso.org/standard/15422.html>.
- [3] ISO. ISO 8990:1994, “Thermal insulation — Determination of steady-state thermal transmission properties — Calibrated and guarded hot box”, International Organization for Standardization, 1994. <https://www.iso.org/standard/16519.html>.
- [4] Instituto Eduardo Torroja, CEPCO y AICIA, “Catálogo informático de elementos constructivos (CEC)”, Ministerio de Fomento, 2010.
- [5] F. Barreca, C.R. Fichera. , 2013, Use of olive stone as an additive in cement lime mortar to improve thermal insulation. *Energy and Buildings* 62, pp. 507-513.
- [6] Soumia Mounir, Youssef Maaloufa, Abou bakr Cherki, Abdelhamid Khabbazi. 2014, Thermal properties of the composite material clay/granular cork. *Construction and Building Materials* 70, pp. 183-190.
- [7] T. Ashour, H. Georg, W.Wu. 2011, Performance of straw bale wall: a case of study. *Energy Build* 43, pp. 1960–1967.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

- [8] Carmona, Cristian et al. Posidonia oceanica as thermal insulation: Determination of the minimum bulk density, according to project specifications, for its use as a building solution on a flat roof. Revista de la Construcción [online]. 2018, vol.17, n.2, pp.250-257. ISSN 0718-915X. <http://dx.doi.org/10.7764/rclc.17.2.250>.

4 - Metodología de caracterización térmica in-situ

El proceso de caracterización térmica mediante el instrumento de caja natural de plancha caliente es capaz de determinar propiedades tanto estáticas como dinámicas de un material o combinación de materiales, la interacción entre diferentes componentes o incluso determinar características de diseño con dichos materiales. Aunque tanto cuando se utiliza la instrumentación desarrollada como cuando se determinan sus características mediante sistemas comerciales, no es posible asegurar que dicho material una vez integrado en un sistema complejo, o debido a posibles modificaciones del mismo durante el proceso constructivo, sufra modificaciones en sus características térmicas.

Por esto, se plantea la creación de un sistema cuyo propósito es la evaluación y caracterización de sistemas constructivos, materiales y otros elementos durante su etapa de utilización, una vez finalizados los procesos constructivos. A su vez, este sistema debe ser aplicable a elementos constructivos donde debido a requisitos específicos no sea posible disponer de los materiales que conforman el sistema, y por lo tanto un instrumento de caracterización del sistema final al completo es la solución ideal.

Como en el caso del desarrollo de la caja natural de plancha caliente, los parámetros de diseño por los que se establece un nuevo instrumento, frente a la utilización de otros sistemas constructivos, debe mantenerse. Parámetros tales como la **sencillez de utilización**, con el fin de permitir implementar dicho análisis a técnicos de la construcción no especializados en medición o instrumentación, **bajo coste de implementación y utilización**, con el fin de evitar limitaciones o impedimentos al uso del instrumento por parte de equipos de diseño pequeños o técnicos liberales, **rapidez de aplicación de la caracterización**, permitiendo agilidad y flexibilidad tanto en procesos de diseño como de mejora energética, y todo esto **manteniendo un nivel de fiabilidad y precisión** adaptada a las necesidades del ámbito constructivo.

El nuevo instrumento debe cumplir ciertos requerimientos adicionales impuestos por las características de la medición a realizar. Al contrario que en el caso de la caja natural de plancha caliente, este instrumento no utiliza un foco térmico con el que crear un gradiente térmico entre las caras del mismo, debido tanto al coste de aplicación como a las problemáticas adicionales que plantea.

El primer problema que se plantea es el tamaño, en el caso de mantener la relación de dimensiones entre el foco caliente y la muestra que se establece en la metodología de aplicación de la caja natural, debemos implementar un foco térmico de unas dimensiones mayores. La aplicación de un gradiente térmico a un muro o cerramiento real, cuyas dimensiones superan en órdenes de magnitud el tamaño máximo establecido de muestra, hace que el foco térmico tenga que incrementar tamaño en la misma proporción.

Adicionalmente, el análisis de un muro o cerramiento real conlleva adaptarse a características tanto en tamaño como en formas muy diversas, que en el caso de la caja natural se solventan gracias a las limitaciones impuestas sobre la muestra en tamaño y forma. Los sistemas comerciales de caracterización térmica de muros o elementos constructivos al completo solventan este problema por medio de dos posibles vías.

Por una parte, es posible delimitar el tamaño del muro analizado al igual que en la metodología de aplicación del instrumento de caja natural de plancha caliente, siendo el principal

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

inconveniente de este proceso la necesidad de construir un muro réplica del sistema complejo a analizar. Esta posible solución tiene como principal inconveniente que el sistema analizado sigue sin ser el elemento constructivo final, y aunque mucho más realista que en el caso del análisis de los componentes por separado, no es posible identificar cómo funciona el muro o cerramiento en su ubicación final y en uso.

Otra dificultad de esta solución, y que es uno de los aspectos fundamentales por los que se decide desarrollar un instrumento de caracterización de elementos constructivos finales, es la implantación del sistema sobre muros o cerramientos donde no conocemos con detalle los materiales que conforman el sistema o aunque conocido no es posible acceder a los mismos para la fabricación de una réplica a analizar. Un claro ejemplo de esta última problemática la encontramos en el análisis térmico de construcciones históricas o protegidas, donde no es posible la realización de catas o ensayos destructivos y el factor de degradación de los materiales tiene un impacto importante [1].

Otra posible solución que plantean los sistemas comerciales es la utilización de un foco térmico que, aunque mucho mayor que en el caso de los sistemas de caja caliente, tiene unas dimensiones reducidas. Este foco térmico se aplica a una zona aislada del muro, focalizando en la medida de lo posible la transferencia de calor e intentando conseguir una transmisión de flujo térmico directa entre ambas caras. Existen dos inconvenientes en la aplicación de esta solución, por una parte aunque el sistema intenta focalizar el flujo térmico la masa del propio elemento produce efectos de dispersión térmica que en cierta medida distorsionan los valores obtenidos.

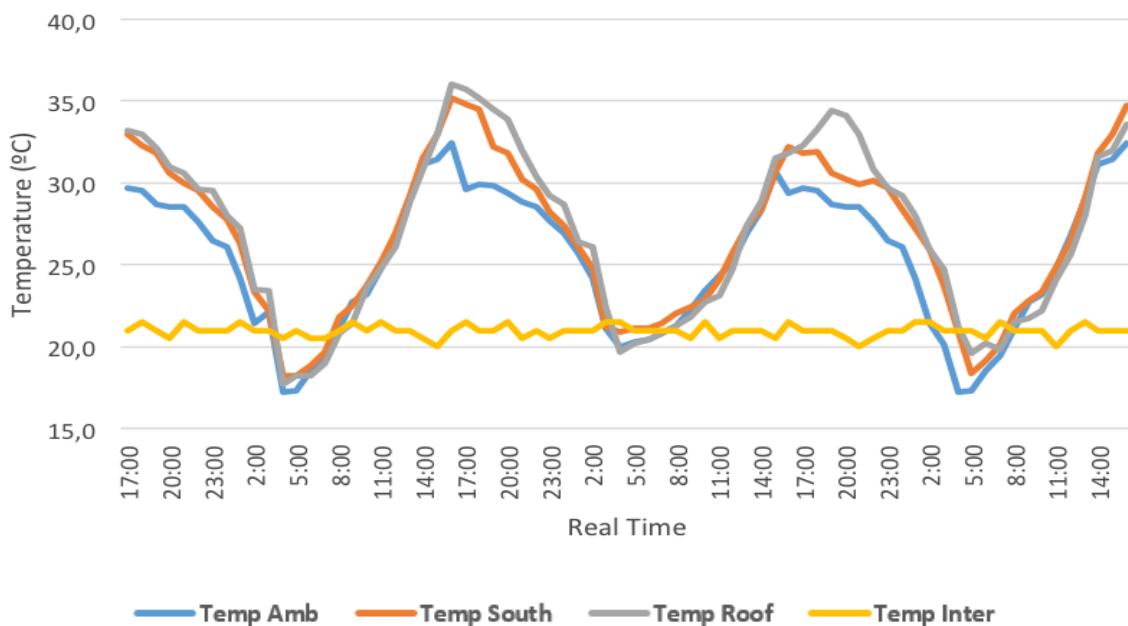


Ilustración 33. Ejemplo de temperaturas superficiales de orientación Sur y cubierta, temperatura interior y ambiental de un elemento expuesto al exterior.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Adicionalmente y como comentado anteriormente, con el fin de obtener una caracterización representativa de un bloque de aislamiento debemos analizar el mismo en estados de funcionamiento estacionarios, así como transitorios. Para un análisis realista del bloque de aislamiento, deberíamos aplicar un foco caliente capaz de simular tanto estados estacionarios límite, efectos transitorios presentes en el ciclo día/noche, así como ciclos estacionarios los cuales establecen un nivel de carga térmica distinta del bloque de aislamiento, a los que se encuentra expuestos el elemento analizado.

Con el fin de poder analizar el elemento de ensayo en su estado de funcionamiento más realista posible, se establece como foco térmico el propio flujo térmico al que se expone en la realidad. Esto no se encuentra libre de problemáticas, como variabilidades climáticas o flujos térmicos de niveles inferiores y cercanos a la resolución de los sensores de medición utilizados, pero el impacto de las mismas se minimiza mediante una metodología de aplicación del instrumento de caracterización térmica in-situ.

4.1 Base de funcionamiento.

Al igual que en la caja natural de plancha caliente, el instrumento monitoriza los valores de temperatura en ambas caras de un bloque de aislamiento, así como el flujo térmico que atraviesa el mismo cuando se expone a un foco térmico. Al contrario que en el caso de la caja natural de plancha caliente, este instrumento es aplicable en bloques de aislamientos contruidos (muros, cubiertas y otros cerramientos).

La necesidad de utilización del instrumento en zonas o elementos donde no es posible una aplicación directa del mismo, así como ambientes no controlados (expuestos a humedad, suciedad y otros compuestos volátiles) o incluso la necesidad de trabajo sin una fuente de alimentación controlada.

Los requerimientos que se imponen sobre el sistema de caracterización insitu y que determinan las propiedades mínimas a cumplir por el mismo son las siguientes:

- Posibilidad de monitorización de zonas de difícil acceso o excesivamente separadas, utilización de comunicación alámbrica protegida o sistemas inalámbricos.
- Protección de los componentes electrónicos, tanto a la humedad como otros residuos o agentes nocivos.
- Posibilidad de funcionamiento autónomo, sistema de baterías capaz de alimentar el instrumento durante la realización de la caracterización de un bloque de aislamiento.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

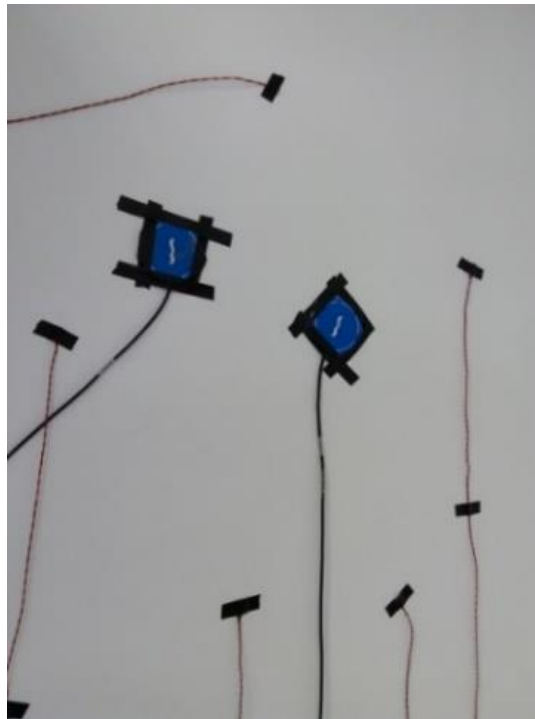


Ilustración 34. Ejemplo de aplicación de los sensores de la cara “fría” o interior del instrumento de caracterización insitu desarrollado.

La Ilustración 34 muestra un ejemplo de la aplicación de los sensores en la cara “fría” o interior del muro de aislamiento analizado. En concreto esta imagen pertenece al análisis de un muro de “pared verda” descrito en detalle y analizados los resultados en el artículo adjunto [1].

Con el fin de cumplir dichos requerimientos, el instrumento de caracterización térmica insitu está compuesto por una etapa de captación y una etapa de almacenamiento de datos. La separación entre los transductores de magnitudes físicas y los componentes electrónicos, permite una protección más personalizada de los mismos adaptándose a las distintas necesidades entre ellos.

En el caso de la etapa de captación los requerimientos de protección contra agresiones externas (humedad, polvo, etc.) son menores debido a la propia protección de los transductores y a la simplicidad electrónica de su aplicación directa. Por otra parte, los sistemas electrónicos y los sistemas de alimentación del instrumento necesitan una mayor protección y no presentan una protección propia inherente.

La protección ambiental de los componentes electrónicos y del sistema de alimentación autónomo se realiza mediante una caja eléctrica estanca IP55 de la marca Schneider, la cual ofrece protección contra proyecciones de agua y protección contra el polvo. Se ha seleccionado esta tipología de encapsulado no únicamente por su protección, sino que adicionalmente proporciona una sencillez de instalación y una apariencia que fácilmente pasa desapercibida evitando de esta medida la manipulación por parte de personal no autorizado durante la realización de un ensayo.



Ilustración 35. Caja eléctrica estanca de la marca Schneider con protección IP55, utilizada para el encapsulado de los componentes electrónicos.

Como comentado anteriormente, la etapa de sensorización debe capturar tanto los valores de temperatura interiores como exteriores del bloque de aislamiento a analizar. Analizar valores tanto interiores como exteriores de temperatura implica la necesidad de establecer comunicación entre el interior y el exterior del bloque de aislamiento. La comunicación de los sensores exteriores se realiza mediante dos modalidades, cableada o inalámbrica dependiendo de las restricciones físicas, el tiempo de caracterización y criterios adicionales.

De forma predeterminada se utiliza comunicación cableada entre los sensores térmicos dispuestos en el exterior del bloque de aislamiento y la etapa de almacenamiento, debido tanto a la reducción de coste, la reducción de complejidad (evitando pérdida de datos, desincronizaciones, etc.) y la mejora en protección del sensor. En los casos donde uno de los requisitos impuestos a continuación se cumpla:

- a) Es posible el paso de cable entre el exterior e interior del bloque de aislamiento, mediante el uso de huecos presentes (puertas, ventanas, etc.).
- b) La monitorización excede las 72h, evitando así problemas de autonomía en el caso de una comunicación inalámbrica.
- c) La caracterización se produce en un ambiente de alto ruido electromagnético (zona de obra, cercanía a antenas de alta potencia, etc.).

En el caso de que ninguno de los anteriores requisitos se encuentre presentes durante la realización del ensayo, es posible la utilización de un sistema inalámbrico para la comunicación de los sensores térmicos exteriores. Dicha comunicación se realiza mediante un módulo integrado de comunicación RF 2,4GHz, el cual es controlado en la zona exterior por un PIC16F84 y su única función es capturar el valor analógico de la señal del transductor y enviarla al nodo de almacenamiento interior. Este sistema tiene un muy bajo consumo, inferior a 1uA en reposo y 10mA durante comunicación, por lo que su alimentación puede realizarse mediante un sistema autónomo de baterías AA. Con el fin de asegurar el correcto funcionamiento del sistema se recomienda la sustitución de las mismas cada 10 ensayos como máximo.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Los sensores utilizados son los mismos que en el caso de la caja natural de plancha caliente, para el caso de la temperatura se utilizan transductores térmicos analógicos NTC (NTCLG100E2104JB) y para el caso del flujo térmico se utiliza el sensor HFP01-05 de la marca Hukseflux. Estos sensores, como se ha comentado anteriormente, disponen de una cobertura y protección contra efectos ambientales, tales como lluvia o temperatura, aunque en el caso de los sensores térmicos exteriores debe utilizarse un sistema de anclaje que evite el impacto directo de la radiación solar.

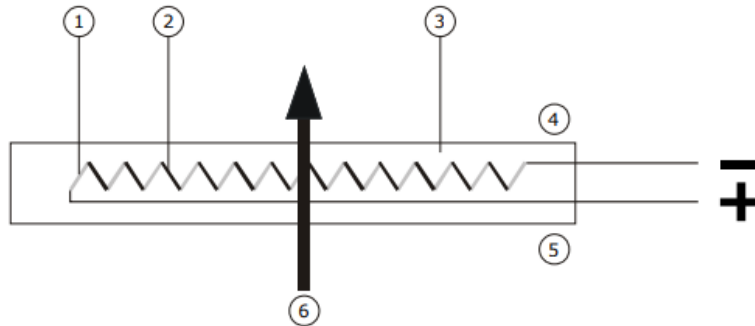


Ilustración 36. Esquema del sensor de flujo térmico y la polaridad interior del mismo.

Otro aspecto importante durante la instalación y utilización del instrumento, y al igual que en el caso de la caja natural de plancha caliente, es la polaridad del sensor de flujo térmico. La polaridad del sensor representada en la Ilustración 36 ofrece por una parte una mejora de la sensibilidad cuando el flujo térmico atraviesa desde la cara "caliente" o exterior, cara número 5 en la Ilustración 36, y la cara "fría" o interior, número 4 en la Ilustración 36, sino que adicionalmente se mejora la sensibilidad del sensor y mejoramos el rango de medición dispuesto por el sistema de adaptación. Con el fin de facilitar la instalación y evitar errores de medida la cara "fría" o interior del sensor está indicada sobre el mismo con color azul, y la cara "caliente" o exterior con un color rojo, podemos observar estas indicaciones en la Ilustración 37.



Ilustración 37. Sensor HFP01-05 de la marca Hukseflux utilizado para la captura del flujo térmico, donde podemos observar la cara expuesta a la zona "caliente" (izquierda) y zona "fría" (derecha). Imagen propiedad de Hukseflux.

4.2 Procesado de resultados.

Los datos obtenidos y almacenados por el instrumento deben tratarse previamente a la obtención de los valores descriptivos deseados en la caracterización térmica de materiales. En el caso del sistema de caracterización in-situ CRTM al igual que en el instrumento de caja natural de plancha caliente, los datos se almacenan en una base de datos tal y como se reciben los mismos, sin realización de procesado o tratamiento de los mismos.

Para la realización del tratamiento de datos y obtención de los resultados de la caracterización se ha utilizado el programa de procesamiento matemático MATLAB. El procesamiento de los datos se realiza en cuatro etapas:

- Preparación y limpieza de los datos: eliminación de aberraciones, control temporal de captación de valores, comprobación rango valores.
- Conversiones: transformaciones entre valores de tensión capturados y valores físicos correspondientes, tanto en temperatura como flujo térmico.
- Calculo: obtención de los valores de conductividad térmica, inercia térmica y cumplimentación de normativa.
- Presentación de resultados: creación de gráficas y tablas de resultados para la asimilación de los valores característicos y la respuesta temporal del material.

Estas etapas aseguran una rápida y fiable obtención de resultados correctos, aun cuando pequeños errores de ruido o interferencias se encuentran en los valores captados. A su vez durante la etapa de preparación y limpieza de datos se establece un máximo de errores presente en los valores capturados, que permitan la correcta obtención de valores.

Por todo esto, la primera etapa de preparación y limpieza de datos se realiza tan pronto como el archivo de datos obtenidos por el instrumento es seleccionado, informando al usuario en caso de que no sea posible continuar con el procesamiento y por lo tanto, evitando la obtención de valores de caracterización erróneos.

En la Ilustración 38 podemos observar los resultados de aplicación del instrumento, resultados expuestos en [1], una vez tratados por la primera etapa de preparación y limpieza. Como se puede observar, aunque los valores toman valores representativos no es posible determinar las magnitudes físicas a las que hacen referencia, especialmente en el caso de la temperatura dado que al tratarse de un NTC el valor obtenido decrementa cuando la temperatura medida incrementa.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

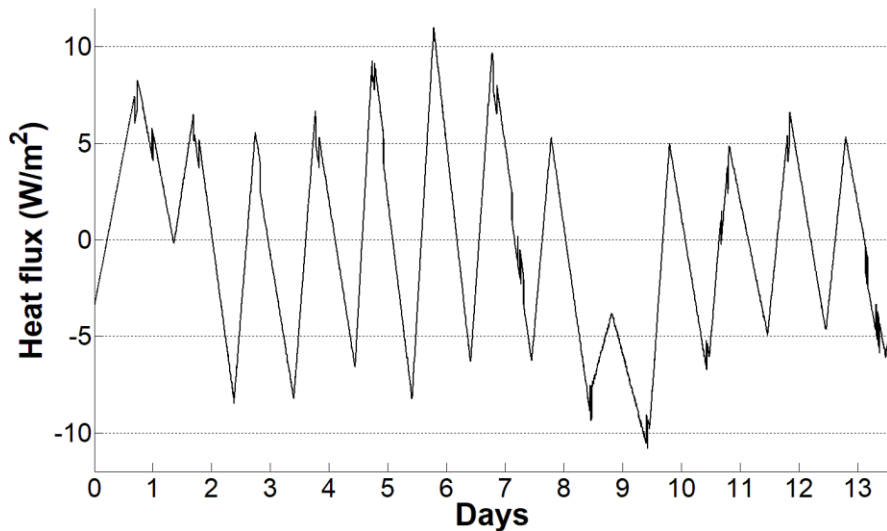


Ilustración 38. Valores de flujo térmico capturados y tratados por el sistema de prefiltrado digital.

Una vez obtenidos los valores limpios del ensayo, es necesario transformar los mismos desde los valores de tensión obtenidos durante la captura de datos al valor de magnitud física que representa. Para la transformación de los valores se utilizan dos técnicas distintas, basada en tabla de referencia para el caso del transductor térmico y una aplicación directa de la sensibilidad del transductor en el caso del sensor de flujo térmico.

En el caso del transductor térmico se ha decidido la utilización de aproximación a valores de tabla de referencia, y no aplicación de la ecuación Steinhart–Hart [2] con el fin de reducir el postprocesado de los datos y acelerar la obtención de los valores finales. La utilización de tablas de referencia hace uso de valores precalculados pertenecientes a una función logarítmica, que al encontrarse en un rango de temperaturas reducido y conocido permite simplificar la función a una relación lineal entre puntos de la tabla.

En el caso del sensor de flujo térmico la relación de sensibilidad es lineal y nos permite la aplicación directa de la misma para la obtención del valor de magnitud física. Siendo la sensibilidad $60 \times 10^{-6} \left(\frac{V}{(W/m^2)} \right)$ para el caso del sensor de flujo térmico HFP01-05 y conociendo la resolución del sistema de captura ADC (10b), el rango de tensión de alimentación del mismo sistema (0-5V) y la ganancia del sistema de amplificación utilizado (Variable entre $G=150$ hasta $G=750$).

Una vez conocidos los valores tanto de temperatura interior como exterior, así como flujo térmico por unidad de superficie del bloque de aislamiento se obtiene el valor de resistencia térmica siguiendo la anteriormente obtenida Ecuación 9.

$$R = \frac{\Delta T(^{\circ}C)}{HeatFlux (W/m^2)} \quad (9)$$

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Debe considerarse que el valor obtenido es un valor instantáneo, el cual fluctúa temporalmente en función tanto de la carga térmica del bloque de aislamiento, etapa detallada en la descripción de aplicación de la caja natural de plancha caliente y conocida como PC o periodo de calentamiento. Cabe destacar que el PC en el caso de un muro de aislamiento expuesto a la intemperie no tiene un tiempo estimado debido a las variaciones térmicas del ciclo día/noche, por esto se deben conseguir dos requisitos antes de establecer el valor final objetivo del ensayo.

Los requisitos para conseguir un valor representativo de transmitancia térmica de un muro de aislamiento expuesto a un flujo térmico variable y cuyo análisis se realiza únicamente en el estado transitorio, son los siguientes:

- Variabilidad térmica entre valles y crestas térmicas inferiores al 15%, valor que minimiza el error presente en la determinación de la transmitancia térmica tal y como se demuestra en el apartado de errores del instrumento de caracterización insitu.
- Promediado del valor medio de un mínimo de cinco ciclos día/noche, siendo este el primer punto donde obtenemos valores representativos, aunque se recomienda con el fin de reducir el rango de error un análisis prolongado a 6-7 días.

Estos requisitos conllevan un sistema de postfiltrado encargado de establecer un valor filtrado de la transmitancia térmica del bloque de aislamiento analizado. El sistema de postprocesado está compuesto de tres etapas, una etapa inicial en la que se determinan los ciclos día/noche permitiendo analizar los mismos por separado y establecer los requisitos propuestos.

Seguidamente se establecen los ciclos día/noche “válidos”, donde no existe una variabilidad excesiva entre valles y crestas térmicas. Para esto, se establece una media en bloques de tres ciclos día/noche la cual se compara con cada uno de dichos ciclos, este proceso se repite desplazando la media un ciclo, y tanto para el valor de valle como de cresta, por lo que todos los ciclos se comparan, salvo los dos primeros, con tres medias de bloque en cada caso. Cuando un ciclo día/noche se encuentra fuera del rango establecido en dos o más bloques de media, dicho ciclo se rechaza para el cálculo final.

Finalmente se realiza un promediado tanto de valles, crestas como ciclos completos con el fin de obtener tanto el valor medio transmitancia térmica en funcionamiento del bloque de aislamiento, así como la respuesta esperada para el trabajo en los extremos térmicos a los que se expone.

4.3 Cálculo de errores.

El conocimiento del rango de fiabilidad del instrumento, al igual que en el resto de instrumentos/metodologías desarrolladas es base para la correcta aplicación del mismo, así como de los resultados obtenidos. Al igual que se ha comentado en el apartado inicial de estado del arte, como en el caso de la caja natural de plancha caliente, los resultados obtenidos con los instrumentos aquí desarrollados no intentan sustituir o rivalizar con los resultados obtenidos con instrumentos disponibles en la actualidad, los cuales siguen normativas internacionales y un procedimiento mucho más estricto que los aquí descritos.

Por otra parte, los instrumentos desarrollados en la presente tesis intentan otorgar valores aproximados y de utilidad para su uso en el campo de la arquitectura y el diseño estructural.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Esta premisa permite el seguimiento de las normativas dispuestas de una forma más laxa, siempre y cuando se respeten en la medida de lo posible las normativas de construcción sobre las cuales se dará uso a los resultados obtenidos. En el caso que nos ocupa la normativa aplicable más representativa ISO 9869-1:2014 [3], establece una desviación máxima del valor de transmitancia del elemento analizado del 14%, teniendo en cuenta los posibles focos de error.

Adicionalmente, se debe conocer que no todos los focos de error posibles han sido considerados, debido tanto al impacto de los mismos sobre el resultado final como a la dificultad de obtención de valores característicos de ciertos focos. Como ejemplo, en el caso de la conversión Analógica-digital, conversor ADC, observaremos como únicamente se contempla el error de resolución, aunque se reconoce la presencia de errores de linealidad (tanto integral como diferencial), errores de monotonicidad, errores de ganancia o errores de offset.

Todos los focos no contemplados tienen un impacto muy inferior al 1% en error unitario y por lo tanto no son representativos en el cálculo final del error de la medida, aunque conociendo su existencia se impondrá un factor de seguridad, evitando la aproximación al valor límite dispuesto por normativa.

El principal factor afectando el valor de error final que acarrea la transmitancia obtenida por el instrumento viene determinada por el error producido por los sensores durante el proceso de captura, aunque no despreciables son los errores que se acumulan tanto durante el proceso de filtrado de dichos valores como el postprocesado final de los mismos. Como medida de limitación en la propagación del error inherente a la medida se utiliza el valor límite de error para los mismos del 3%.

Dicha limitación, como comentado en el apartado de caja natural de plancha caliente se cumple en cada uno de los sensores, tanto térmicos como de flujo de calor, utilizados. En el caso del transductor térmico (NTCLG100E2104JB) el error asociado a la medida sobre una temperatura media ambiental de 25°C es de $e_{temp} = 4,56\%$, para limitar el impacto del error de dicho sensor a los rangos establecidos del 2% debemos utilizar la técnica de multimuestreo, donde siguiendo la Ecuación 10 (suponemos incertidumbre con distribución de probabilidad de Gauss) determinamos el error asociado a la lectura de un sensor cuando la misma se realiza con N sensores de características similares.

$$\vartheta = \frac{\vartheta_{n-1}}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

Esto determina que el número mínimo de muestras de temperatura a tomar para establecer un rango de incertidumbre inferior al 3% es de 5 medidas. Utilizando el mínimo número de transductores establecido y suponiendo una distribución sobre la superficie de medida sin interferencias, **la incertidumbre total de la medida de temperatura tanto interior como exterior es de 2.04%.**

En el caso del sensor de flujo térmico un único sensor ya establece el rango de incertidumbre en 3% con un nivel de confianza superior al 95% ($k=2$), aunque con el fin de mejorar el error final propagado se recomienda la utilización de dos sensores en el análisis de un muro de aislamiento común. En el caso analizado en el que se utilizan dos sensores sobre el mismo proceso de análisis **la incertidumbre final de la medida, determinada por la Ecuación 10, es de 2.12% para la medida del flujo térmico.**

El siguiente foco de incertidumbre que se contempla en el presente estudio tiene relación con la conversión de un valor analógico, como es la tensión suministrada por los transductores o el esquema de conexión de los mismos, hasta un valor digital utilizable por los sistemas de captación desarrollados.

En el caso de un conversor ADC el error de cuantificación que asocia a la medida convertida es como máximo el rango que representa un paso del valor digital obtenido, como se observa en la Ilustración 39 existe un rango de valores analógicos que se distribuyen entre un valor convertido digital y el siguiente.

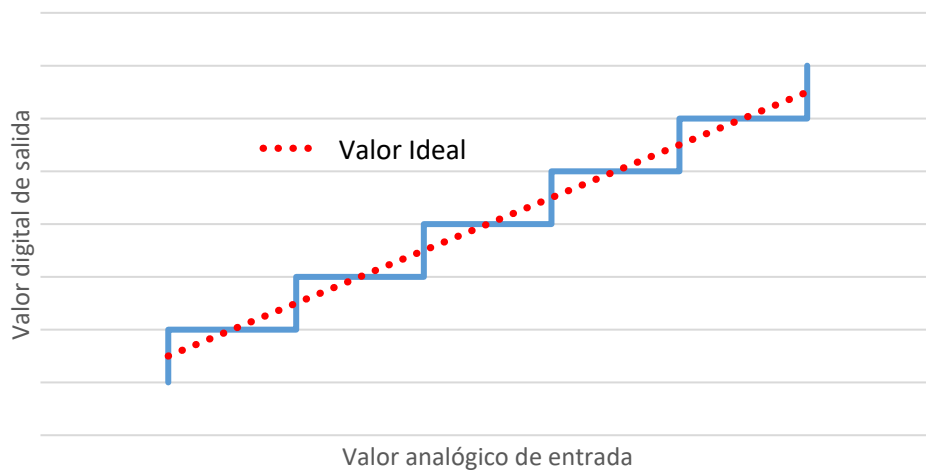


Ilustración 39. Relación entre señal analógica y señal convertida digital en la aplicación de un conversor ADC.

En el caso del conversor ADC utilizado la resolución del mismo es de 10b, por lo que el rango total de captación se representa en un total de 1024 pasos, conociendo dicho rango de medida como [0-5V] se determina que un paso tiene un valor de 4.88mV. Conociendo el salto mínimo que se puede producir en el valor digital obtenido por la conversión ADC, 1LSB = 4,88uV, se determina conociendo el rango de entrada posible que el error asociado a dicha conversión es inferior al 1%, en concreto 0.0976%.

Con estos valores de incertidumbre para los focos de error predominantes se procede al cálculo de propagación de errores del sistema de caracterización insitu. El primer paso es hallar el error del valor de transmitancia cuando todavía el valor se encuentra en forma analógica y seguidamente se establecerá la conversión ADC con una ganancia nula ($G=1$).

$$\vartheta U_{anlg} = \left(\frac{\vartheta F}{F} + \frac{\vartheta T_e + \vartheta T_i}{(T_e - T_i)} \right) * U_{anlg} \quad (11)$$

Como se observa en la Ecuación 11, el error de la transmitancia analógica (ϑU_{anlg}) viene determinado por tanto por el error del sensor de flujo térmico (ϑF) como los errores de sensores de temperatura tanto exterior (ϑT_e) como interior (ϑT_i).

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

$$\vartheta U = \left(\frac{\vartheta U_{anlg}}{U_{anlg}} + eADC \right) * U \quad (12)$$

Donde, el error final de la medida de transmitancia térmica (ϑU) viene determinado tanto por el error de transmitancia térmica que se encontraba presente en su estado analógico (ϑU_{anlg}), como el error asociado a la conversión analógica-digital ($eADC$). Destacar que tanto el error de transmitancia analógica como final, Ecuaciones 11 y 12, está asociado a una medida en concreto, por lo que para obtener el caso límite debemos imponer el peor caso en el que se realizará el ensayo.

Para la obtención de un error de la transmitancia térmica final de un muro de aislamiento, utilizando la Ecuación 9, se han establecido los valores límite como: $F < 100$ (W/m^2), $T_e = (T_i + 5)$ ($^{\circ}C$) y por lo tanto $U < 20$ ($W/m^2^{\circ}C$). Disponiendo de estos valores límite se establece el error máximo de la transmitancia como $\vartheta U < 1.26$ ($W/m^2^{\circ}C$), para el caso de un valor de transmitancia térmica de $U = 20$ ($W/m^2^{\circ}C$), por lo que el **máximo error** relativo final del sistema será del **6.3%**.

Como se ha comentado anteriormente, este error aunque no contempla todos los posibles focos de efecto, es muy inferior al límite de 14% establecido por norma UNE. Aunque existen múltiples simplificaciones, tanto en la aplicación del procedimiento como en el desarrollo del instrumento, es posible determinar que los resultados finales obtenidos son representativos y de utilidad a técnicos y profesionales del sector de la construcción.

Referencias

- [1] C. Carmona, G. Horrach, F. Masdeu, J. Muñoz (2018). "Comparative analysis of thermal characterisation methodologies of a historical double leaf masonry wall". *International Journal of Masonry Research and Innovation*. 3. 403. 10.1504/IJMRI.2018.095704.
- [2] J. S. Steinhart, S. R. Hart (1968). "Calibration curves for thermistors, *Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts*", Volume 15, Issue 4, August 1968, Pages 497–503, ISSN 0011-7471, doi:10.1016/0011-7471(68)90057-0
- [3] ISO. 9869-1:2014 (2014) "Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 1: Heat flow meter method", International Organization for Standardization (2014). <https://www.iso.org/standard/59697.html>

5 – Breeze

5.1 Introducción

Breeze es un instrumento que por una parte sigue las premisas de bajo coste, la reducción de complejidad sobre otros sistemas existentes y la inclusión de los usuarios en la gestión energética y confort. Adicionalmente, el instrumento utiliza en gran medida del conocimiento adquirido durante la construcción y utilización tanto de la caja natural como el instrumento de caracterización in-situ.

El objetivo del instrumento denominado Breeze, al contrario que en el caso de los instrumentos anteriormente desarrollados, no es la caracterización de los elementos constructivos de una vivienda sino la modelización del confort dentro de la misma. Analizando variables ambientales tales como temperatura, humedad y velocidad de viento el sistema obtiene una imagen del estado actual tanto del interior como del exterior de la vivienda y es el análisis de estos estados los que nos permiten determinar las características de influencia sobre el confort del usuario.

Breeze es un instrumento que se desarrolla para solventar una problemática concreta dentro del ámbito de la construcción, intentando solventar un paradigma presente en viviendas donde la ventilación interior no se produce de manera automática o forzada [1], y se debe realizarse por parte de los usuarios de la misma mediante la apertura o cierre de las ventanas o huecos de la misma, técnica de ventilación que se denomina ventilación cruzada.

La **ventilación cruzada** consiste en el aprovechamiento de las corrientes de aire que se generan dentro de una vivienda para la ventilación de la misma [2], para esto existen **dos premisas** que se deben cumplir. Por una parte, para el correcto funcionamiento de una ventilación cruzada las aberturas por las que circula el aire deben encontrarse lo suficientemente separadas, típicamente en caras opuestas de la vivienda, para que **el flujo de aire renueve el aire interior** de la misma. Y adicionalmente, y como factor crítico en el desarrollo de Breeze, los **usuarios han de hacer un uso correcto** de dicha ventilación para mantener un nivel de confort aceptable dentro de la vivienda.



Ilustración 40. Instrumento Breeze, 1) elemento exterior de caracterización, 2) elemento interior de caracterización, 3) módulo de información al usuario.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Debido a la necesidad por parte del usuario final de una vivienda de abrir y cerrar las aberturas para conseguir niveles de ventilación y por lo tanto salubridad dentro de la misma, es altamente importante disponer de información sobre cuándo y por cuánto tiempo es recomendable realizar dicha ventilación. **Teniendo en cuenta tanto la necesidad de ventilación como el estado interior y exterior a la vivienda**, es posible informar al usuario de que debe abrir las aberturas de la vivienda y permitir el paso de aire, **mejorando tanto la salubridad como el confort interior**.

El problema que se presenta y el cual Breeze intenta solventar es la determinación de cuando es correcto, existen condiciones ideales para la ventilación o el deterioro de las condiciones interiores hacen necesaria la ventilación, o cuando no es correcto abrir huecos y ventanas para la ventilación de la vivienda, la temperatura o humedad exterior está muy alejada de rangos de confort.

La determinación de cuando es necesario ventilar para mantener un rango de confort adecuado en el interior de una vivienda se realiza utilizando la normativa descrita en ASHRAE 55-2017 [3], donde se plantean los rangos de confort de un usuario no únicamente utilizando variables climáticas sino adicionalmente utilizando variables tales como actividad del usuario, tipo de ropa o edad media del mismo.

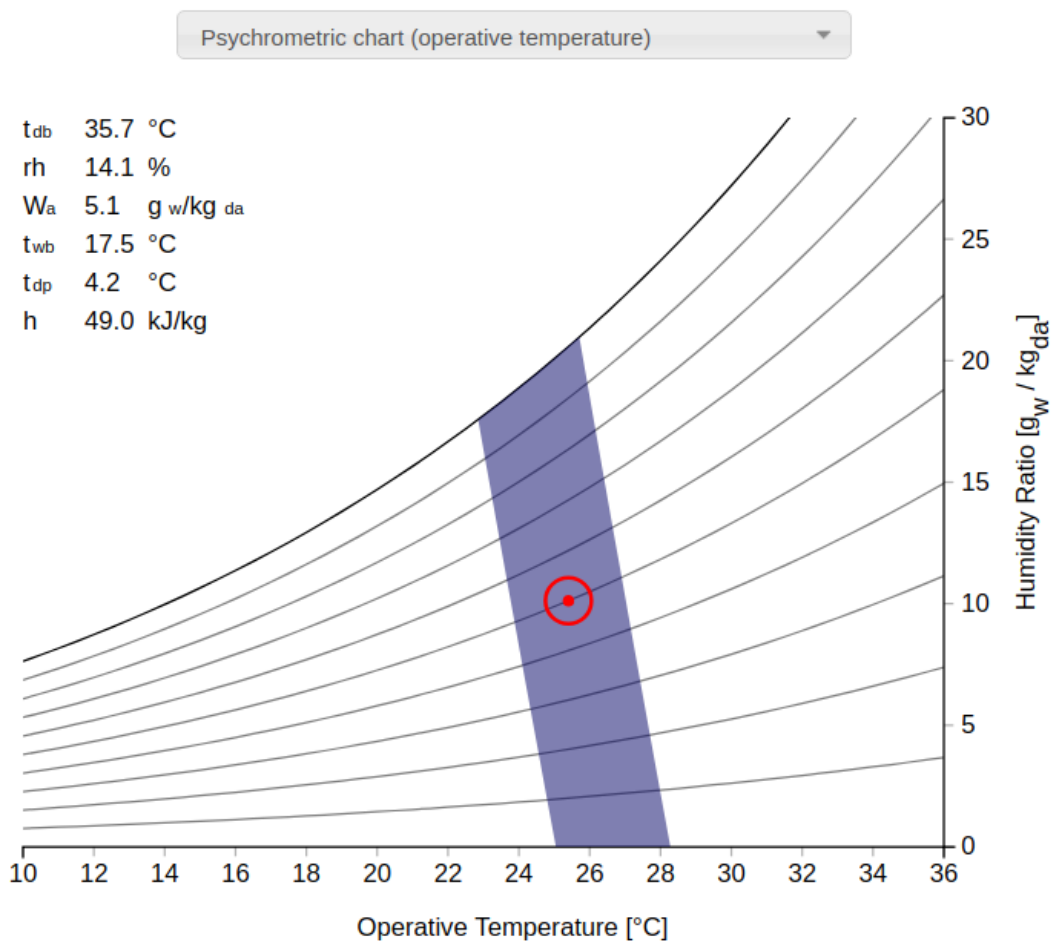


Ilustración 41. Ejemplo aplicación normativa ASHRAE 55-2017.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Ejemplos de la aplicación de la normativa ASHRAE 55-2017 pueden obtenerse mediante la herramienta creada por los investigadores del CBE (Center for the built environment) de la Universidad de Berkeley, California. La Ilustración 41 muestra la aplicación de la normativa mediante la herramienta previamente descrita y disponible en <http://comfort.cbe.berkeley.edu/>.

Donde el rango de confort viene establecido por la zona delimitada en color morado y la situación actual viene representada por el punto rojo. En el caso mostrado la temperatura interior se sitúa en 27°C y HR 70% con una actividad relajada 1.1 met y un nivel de cobertura del usuario de verano 0.5 clo, aún con estos valores que a primera instancia parecen un poco altos, disponer de una ligera brisa de 0,5 m/s hace que la situación actual se sitúe en un rango neutral.

Una vez determinada la idoneidad de ventilación de la vivienda, este dispositivo únicamente realiza funciones de información al usuario o usuarios de la vivienda. Esta limitación de no actuación es autoimpuesta por una parte por la necesidad de educar al usuario de la situación de salubridad en que se encuentra y por otra evitar problemáticas de seguridad o privacidad debido a la actuación del sistema.

El sistema Breeze ha seguido un proceso de control e innovación finalizando en un modelo de protección basado en modelo de utilidad con nombre “Aparato para la gestión de un sistema de ventilación cruzada” [4]. La explotación de dicho modelo de utilidad se encuentra vigente por parte de una empresa pública.

5.2 Base de funcionamiento

La información expuesta por el instrumento Breeze corresponde con un valor de **potencial de eficiencia de ventilación (E)** basada en el confort ambiental y determinado mediante un algoritmo propio. Al igual que en el caso del módulo de información, la presencia de múltiples modelos de Breeze conlleva la necesidad de disponer de múltiples algoritmos que garanticen un valor de **idoneidad de ventilación**.

En el caso de un dispositivo Breeze básico el algoritmo de control, denominado modo verano de funcionamiento, debe disponer de los valores de temperatura tanto interior como exterior, así como el valor de humedad y la velocidad de viento exterior. La aplicación del algoritmo nos otorga un valor que en el caso de ser inferior a la unidad ($E < 1$) indica la necesidad de evitar la ventilación con el interior y en el caso de superar dicho valor ($E > 1$) se determina la mejora de la calidad interior en caso de realizar ventilación. A continuación podemos observar la ecuación del algoritmo de idoneidad de ventilación para un modo verano de funcionamiento:

$$E = \frac{T_i * V_a * \sin \alpha * 100}{T_e * HR_e} \quad (13)$$

Donde T_i y T_e son las temperaturas interior y exterior respectivamente, HR_e es la humedad relativa exterior, V_a es la velocidad de aire exterior y α es el ángulo de incidencia principal del viento sobre la ventana o hueco de ventilación.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

En el caso de un modelo Breeze completo el dispositivo debe otorgar un valor de eficiencia de ventilación así como un valor de necesidad de ventilación por salubridad (H), la relación entre ambos es el valor informativo que se proporciona a los usuarios. El valor de ventilación por salubridad se determina mediante la siguiente ecuación:

$$H = \frac{HR_i * (1.05 * TVoC_i)}{TVoC_e * HR_e} \quad (14)$$

Donde HRI y HRe son las humedades relativas interiores y exteriores respectivamente, TvoCi y TvoCe son los valores de concentración de gases orgánicos volátiles interiores y exteriores respectivamente.

Ambas fórmulas se extraen de las disposiciones impuestas en la normativa “Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy” ASHRAE Standard 55-2017 [3], para el caso del modo verano de funcionamiento. El valor de necesidad de ventilación por salubridad está establecida por la normativa “Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality” ASHRAE Standard 62.1-2013 [4]. Dichas normativas establecen rangos aceptables tanto en temperatura, humedad como gases volátiles para disponer de niveles de confort aceptables.

Una de las premisas de dichas normativas es la actividad realizada en las zonas analizadas, las cuales determinan por lo tanto los rangos aceptables de confort de cada usuario. Dichos niveles de actividad varían desde un nivel mínimo cuando el usuario se encuentra durmiendo (0,7 met) hasta un valor máximo (3,8 met) cuando el usuario presenta un nivel de actividad elevada (carrera continua).

Otro factor importante a implementar en el algoritmo es la dependencia del estado, como nos referimos a la progresión tanto térmica como de calidad del aire interior. Para esto se utiliza un sistema con histéresis, de forma que estemos simulando el efecto del ambiente a mantener su estado actual sin introducir cambios frecuentes en el mismo, o dar información que cambia rápidamente al usuario.

Establecemos tanto un rango límite de cambio de estado, tanto para el caso de un potencial inferior a la unidad donde para establecer la necesidad de ventilación deberemos sobrepasar el umbral de $E = 1.2$, como en el caso de un potencial superior a la unidad donde para establecer un estado correcto en el interior de la vivienda y el cierre de la ventilación se debe encontrar en un valor inferior a $E = 0.8$. A su vez, si por algún motivo se incrementa o decremento rápidamente, en más de 0.15 el valor de potencial de eficiencia de ventilación entre mediciones es necesaria una actuación ante este efecto y si tenemos respuesta por parte del sistema.

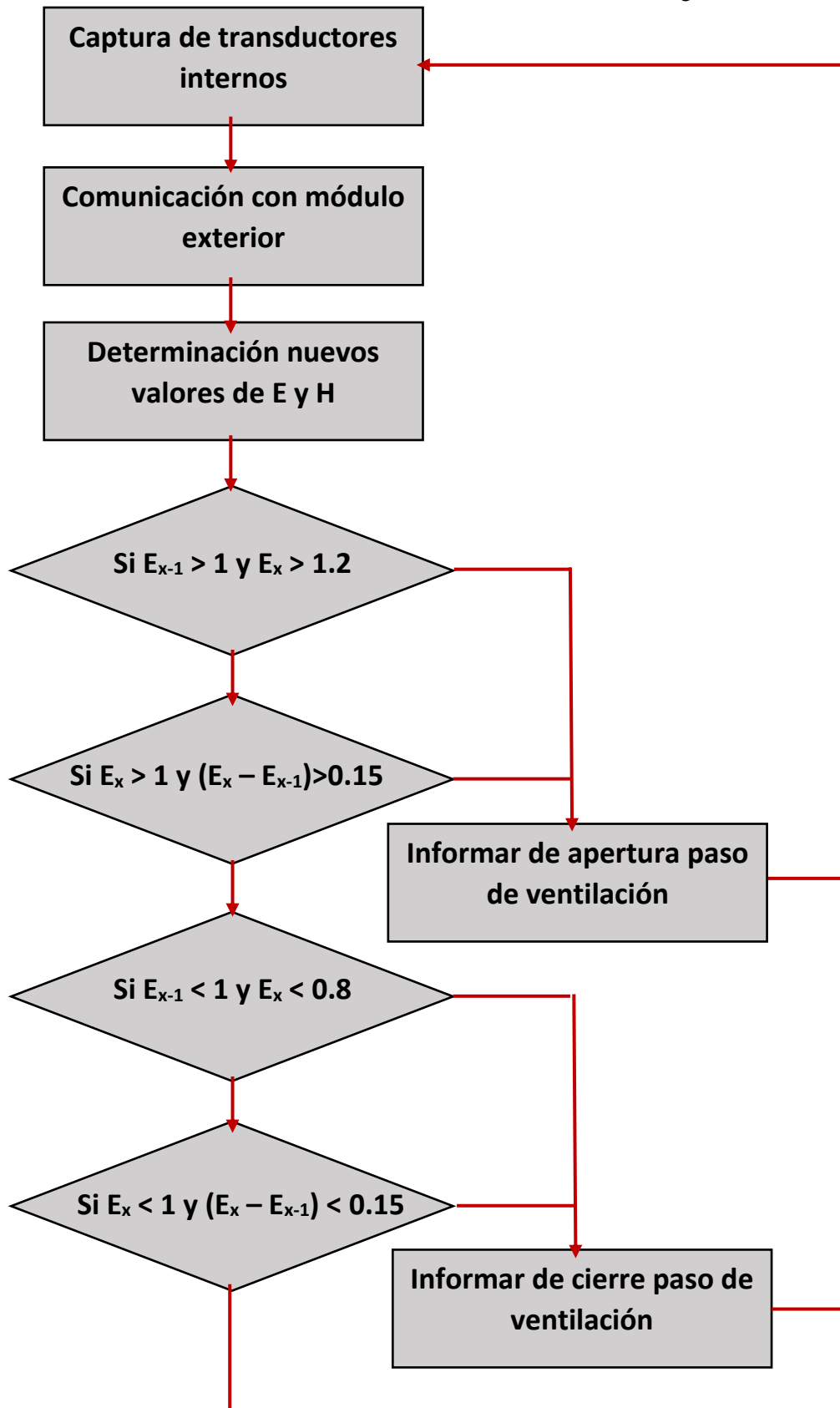


Ilustración 42. Diagrama de flujo modulo interior de caracterización Breeze.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

5.3 Construcción del instrumento

Breeze es un instrumento de monitorización de las condiciones ambientales tanto interiores a una vivienda como las condiciones exteriores a la misma, en concreto el análisis de variables tales como la velocidad de viento exterior, la temperatura y humedad tanto interiores como exteriores y adicionalmente la presencia de gases irritantes o con un impacto negativo sobre la salubridad y el confort interior.

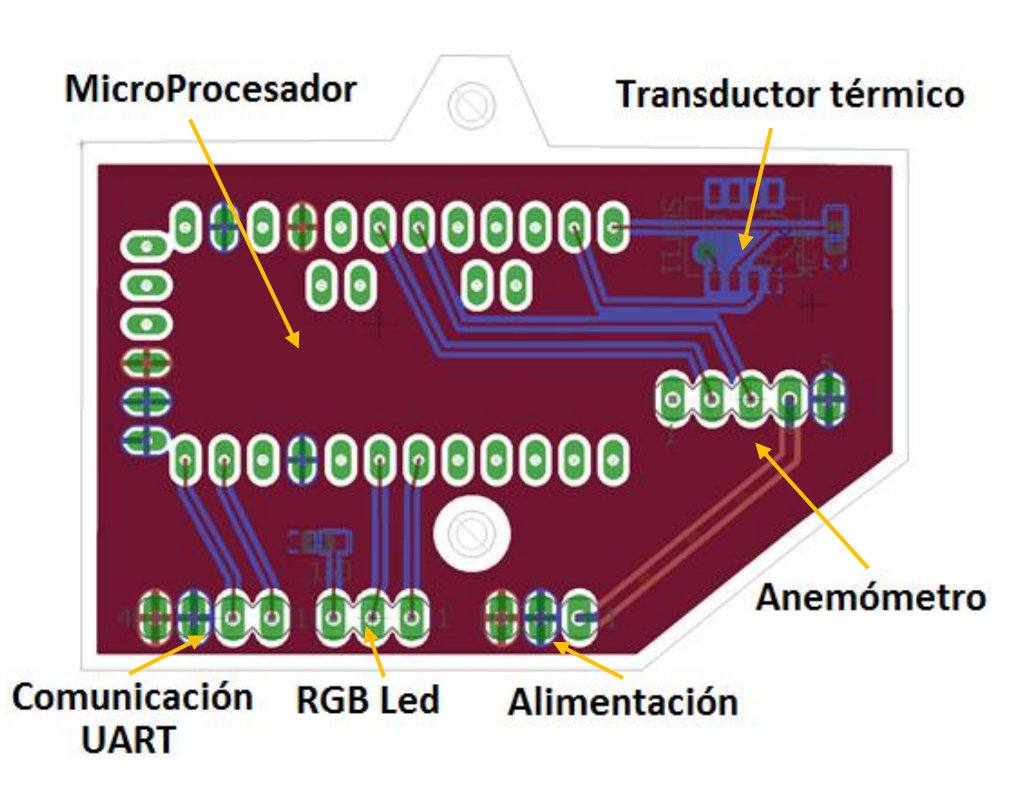


Ilustración 43. PCB modular de captura y tratamiento de datos, utilizada tanto en el dispositivo interior como exterior.

Debido a las necesidades de controlar dos superficies separadas, zona interior y zona exterior, se decide por la división del sistema de control en dos unidades, una para cada zona. Una unidad interior encargada de la captura de variables ambientales tales como humedad, temperatura y calidad de aire, y una unidad exterior encargada de obtener valores de humedad, temperatura y velocidad de viento.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Las mediciones realizadas tanto en la unidad interior como exterior, deben realizarse siguiendo ciertos criterios impuestos sobre la instalación del instrumento, de manera que evitemos la introducción de errores. Factores que afectan las mediciones climáticas en zonas de volumen medio o reducido como puede ser una vivienda es la aparición de microclimas o condiciones puntuales, ejemplos de los mismos pueden encontrarse en zonas donde existe reflejos de radiación solar (determinando temperaturas muy superiores a las reales), zonas de reducción de la sección del paso de aire (donde el caudal se mantiene y sin embargo la velocidad de viento obtenida es mucho mayor) o cobertura de los equipos de medición, lo cual puede provocar efectos de autocalentamiento (lecturas de humedad y temperaturas erróneas).

Otro factor de diseño, que no se aplica en el resto de instrumentos desarrollados en el presente trabajo, es la necesidad de una **fabricación en escala**. En el caso de Breeze, tras el desarrollo del primer prototipo funcional, la primera tanda de fabricación del instrumento ha sido de un total de 55 instrumentos, como se observa en la Ilustración 44 esto conlleva el tratamiento y ensamblaje de un alto número de componentes. Reducciones tanto en el número de componentes, utilizando transductores de múltiples variables, o evitar el diseño de modelos con diferentes características tienen un alto impacto sobre el proceso de montaje final.



Ilustración 44. Acopio de componentes para la fabricación de los instrumentos Breeze. Imagen propia.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Esta necesidad de fabricación en serie conlleva ciertos requisitos de diseño, la posibilidad de utilizar una misma PCB tanto para el sistema de medida interior como exterior permite una importante reducción del coste de fabricación de los mismos. En la Ilustración 43 se observa el diseño de placa realizado y como en un mismo modelo disponemos de los footprints de componentes utilizados tanto en el modelo interior como exterior. Así como pines de entrada y salida tanto de datos como alimentación compartidos entre ambos modelos, como en el caso del conexionado del módulo de información o el transductor de velocidad de viento.

Una vez establecidos los requisitos de fabricación se establecen los transductores a utilizar. Para el caso de la temperatura y humedad interior de la vivienda se selecciona un sensor de bajo coste, que aunque su resolución y precisión no son especialmente notables otorga valores representativos para el sistema propuesto. El sensor para la calidad del aire utilizado se basa en un sensor MOX de gases capaz de detectar un amplio rango de compuestos orgánicos volátiles (TVoCs).

El sensor de velocidad de viento utilizado se basa en tecnología de hilo caliente y se encuentra totalmente integrado fabricado por Modern Devices, en concreto el anemómetro utilizado es el Wind Sensor Rev P. Este sensor nos permite detectar rápidamente valores de velocidad de viento media y baja, propia en zonas interiores de viviendas y zonas urbanas.

Los valores de todos estos sensores son capturados y analizados utilizando un microcontrolador ATMEL, en concreto Atmega328 implementado sobre la plataforma Arduino mini PRO. Aunque un sistema 'Off the shelf' limita las posibilidades de alimentación e impone importantes restricciones de tamaño, el dispositivo seleccionado y sus características lo hacen altamente aplicable al presente sistema.

Debido a las características de alimentación del sensor de velocidad de aire seleccionado, necesitando una fuente de alimentación capaz de suministrar una tensión de entre 9V y 12V, utilizamos una fuente de alimentación de 9V la cual alimenta únicamente un microcontrolador y el propio sensor de viento. La plataforma de prototipado Arduino utilizada dispone de un regulador de tensión DC-DC el cuál asegura una tensión de 5V utilizada tanto por el propio microcontrolador como el resto de sensores circundantes.

5.4 Modulo de información y sistemas de comunicación

Una vez determinada la idoneidad de ventilación de la vivienda mediante el potencial de eficiencia de ventilación (E), el instrumento únicamente informa al usuario de las acciones idóneas a realizar evitando aun cuando sea posible actuar sobre los elementos de control (Ventanas con control electrónico, persianas automáticas, etc.). Esta limitación de no actuación es autoimpuesta, por una parte por la necesidad de educar al usuario de la situación de salubridad en que se encuentra y por otra evitar problemáticas de seguridad o privacidad debido a la actuación del sistema.



Ilustración 45. Módulo de información Breeze. Imagen propia.

Para informar al usuario se utilizan dispositivos leds en diferentes disposiciones o colores, los cuales son indicativos de las acciones ideales para alcanzar un nivel de confort aceptable en la vivienda. Dependiendo de las necesidades que debe cubrir Breeze se han desarrollado múltiples modelos de información con diferentes capacidades, por lo que dependiendo del modelo disponemos de diversas configuraciones de leds informativos.

Desde la versión térmica, donde un único led RGB indica la idoneidad de realizar ventilación mediante un color verde o iluminando el mismo led de color rojo informamos de la necesidad de evitar la ventilación debido a las condiciones adversas exteriores lo cual únicamente empeoraría el confort o nivel de salubridad interior. Hasta modelos completos de Breeze donde se realizan tanto las mediciones térmicas de salubridad, como la medición de gases irritantes o adversos al confort, como pueden ser el exceso de CO₂ o partículas orgánicas volátiles (TVoC) y la información que se transmite al usuario es mucho mayor informando del estado concreto de confort ambiental en el que se encuentra.

Como en el caso de los módulos de medición la necesidad de fabricar un alto volumen de instrumentos conlleva la necesidad de diseñar una PCB modular, capaz de recoger ambos modelos de utilización. La Ilustración 46 muestra la placa de conexionado del módulo de información, donde es posible la utilización tanto de leds sencillos de montaje superficial como led RGB para sistemas con control de calidad del aire.

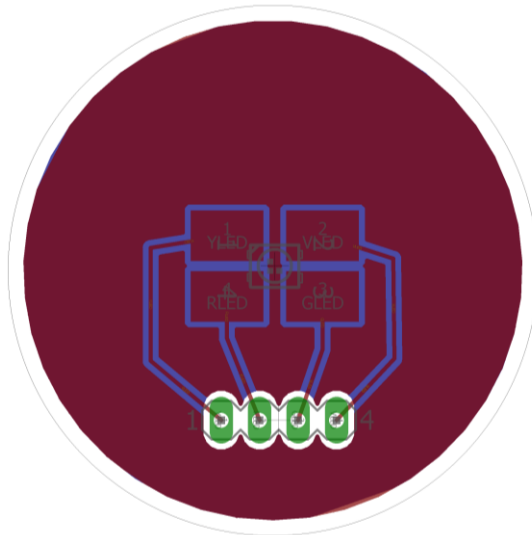


Ilustración 46. PCB del módulo de información de Breeze.

Por otra parte, la división entre unidad interior y exterior propicia la necesidad de comunicación entre dispositivos. Se plantean dos soluciones para la comunicación una inalámbrica y otra cableada, diferentes modelos del sistema Breeze para una mejor adaptación a las necesidades impuestas (coste, sistema compacto, capacidad de instalación, etc.).

Para el caso de la comunicación cableada se ha optado por un protocolo probado e implementado en nuestro sistema Arduino como es UART, siendo la principal ventaja de este modelo la posibilidad de alimentar todo el sistema desde una única fuente de alimentación. En el caso de la comunicación inalámbrica se ha optado por un módulo integrado RF 2,4GHz, dado que las distancias a cubrir no son excesivas y el coste de dichos integrados es mucho más reducidos que otras posibles soluciones enfocadas a automatización y domótica.

Así pues, aunque la monitorización se realiza en dos zonas separadas el valor tanto de eficiencia de ventilación (E) como el de necesidad de ventilación por salubridad (H) se establece en una única unidad. La unidad encargada de realizar el cálculo de los valores a informar al usuario es en todo caso la unidad interior, esto permite a su vez y dados ambos modelos de comunicación entre módulos, la posibilidad de disponer de múltiples módulos interiores los cuales reciben la información del estado exterior desde una misma unidad exterior única.

Referencias

- [1] V. Vasile, H. Petran, A. Dima, C. Petcu, "Indoor Air Quality – a Key Element of the Energy Performance of the Buildings", Energy Procedia, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.150>.
- [2] Linden, P. F. (1999). "The Fluid Mechanics of Natural Ventilation". Annual Review of Fluid Mechanics. 31: 201–238. doi:10.1146/annurev.fluid.31.1.201.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

- [3] ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 55-2017, “Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy”, American National Standards Institute (2017).
- [4] Muñoz, Joan. & Carmona, Cristian & Horrach, Gabriel & Alorda, B. “APPARATUS FOR THE MANAGEMENT OF A CROSSED VENTILATION SYSTEM”, Oficina Española de Patentes y Marcas, 2018, <http://consultas2.oepm.es/InvenesWeb/detalle?referencia=U201830666>.
- [5] ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2016, “Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality”, American National Standards Institute (2016).

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

6 – Factores adicionales de análisis

6.1 Inercia VS Transmitancia Térmica

Los aspectos anteriormente analizados y desarrollados en el presente trabajo toman como base de funcionamiento térmico la transmitancia térmica o resistencia a la transmisión de un flujo térmico de un elemento o bloque de aislamiento. Dichos análisis pueden realizarse tanto en régimen de funcionamiento estacionario como transitorio, aunque en ambos casos únicamente se determina el resultado de exponer el bloque de aislamiento a un ambiente controlado durante un tiempo suficiente como para establecer un balance térmico.

Aunque, cabe destacar que existen otros modelos o variables de caracterización térmica de aislamientos como es la inercia térmica. Definimos inercia térmica como la velocidad de adaptarse a un diferencial térmico de un elemento o muestra, ya sea forzado o natural, este factor temporal depende tanto de su capacidad de absorción térmica, su capacidad térmica, su transmitancia térmica, su volumen, así como el diferencial térmico al que está sometido [1].

Dicha característica térmica tiene especial importancia en el ámbito de la construcción donde la variabilidad térmica diaria, diferencial térmico entre el pico de temperatura máximo y el valle térmico mínimo diario, es posible que tenga una duración inferior al tiempo necesario para establecer un régimen de funcionamiento balanceado. Esto conlleva que la variabilidad térmica (fundamentalmente los ciclos noche/día) sean absorbidos por el propio bloque de aislamiento evitando así la transferencia térmica con el interior de la zona aislada.

Este régimen de funcionamiento, donde no se alcanza un régimen de funcionamiento balanceado con las temperaturas a las que se expone un bloque de aislamiento, puede estar a su vez influenciado por un gradiente térmico impuesto de manera artificial por parte de los usuarios de la zona de protección térmica. En el caso de una pérdida térmica del interior de una vivienda (frio en el exterior y calor en el interior) es común que los usuarios impongan un foco térmico interior mediante el uso de las instalaciones de climatización. En el caso de absorción térmica del interior de la vivienda (calor en el exterior y frio en el interior) los usuarios realizan funciones de aireación/ventilación, principalmente durante los momentos menos cálidos del día, de manera que el elemento aislante desprenda el calor almacenado y evite el balance térmico en los momentos térmicamente críticos.

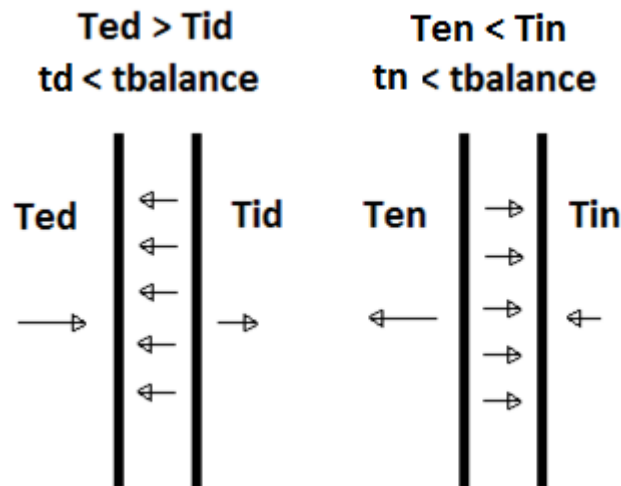


Ilustración 47. Esquema de utilización de la inercia térmica como elemento de resistencia térmica.

En el ámbito de la construcción moderna la inercia térmica o no se considera, o es vista como un factor negativo en cuanto al efecto de protección térmica de una vivienda. Esta imagen negativa de la inercia térmica viene reforzada por su ausencia en legislación y normativas, donde únicamente se consideran variables de caracterización térmica como la transmitancia.

En realidad, la inercia térmica es una variable de caracterización térmica con un alto impacto, siendo el principal factor de aislamiento en edificación tradicional o natural. En dichos sistemas constructivos el uso de elementos con alta resistencia térmica no es posible o su coste lo relega a casos muy concretos, por lo que la mayor parte de bloques de aislamiento se basan en el uso de sistemas de inercia térmica.

Como observamos en la Ilustración 47, es posible utilizar la inercia térmica como una resistencia al paso de flujo térmico, tanto del interior al exterior como al contrario, aprovechando la resistencia presente durante el proceso de calentamiento y enfriamiento del bloque de aislamiento. Si el diferencial térmico al que se exponen las caras del bloque de aislamiento durante el día, diferencia entre la temperatura exterior de día (T_{ed}) y la temperatura interior de día (T_{id}), tiene una duración (t_d) inferior al tiempo de establecimiento térmico para dicha temperatura ($t_{balance}$), el calor al que se expone la vivienda esta atenuado por la absorción del bloque de aislamiento.

A su vez, si se expone el bloque de aislamiento se expone a un flujo térmico contrario durante la franja horaria nocturna, diferencial térmico entre temperatura exterior nocturna (T_{en}) y temperatura interior nocturna (T_{in}), durante un periodo de tiempo nocturno (t_n) inferior al tiempo que tarda el bloque de aislamiento en llegar a un régimen estacionario ($t_{balance}$), estamos utilizando el efecto de la inercia térmica.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

En el caso de que la inercia térmica del material establezca un tiempo para alcanzar una temperatura interior estacionaria (t_{balance}) superior al tiempo de los ciclos de día y noche naturales, se puede determinar que el diferencial térmico en la zona exterior será mucho mayor al diferencial térmico en el interior, realizando así de manera indirecta funciones de aislamiento térmico.

Para crear bloques de aislamiento que aprovechen la inercia térmica se utilizan elementos con alta capacidad térmica, que aunque sus características de transmitancia no sean idóneas, permiten el control térmico del interior de la vivienda. Esto es de especial importancia en construcción tradicional debido a que materiales altamente utilizados debido a su función estructural son a su vez elementos con una alta capacidad y masa térmica, como materiales pétreos o áridos, así como los constituidos por adobes y otros elementos arcillosos [2].

Ejemplos de material con alta inercia térmica son el bloque de tierra compactada (BTCs), altamente utilizado en sistemas constructivos tradicionales del norte de España [3], y el sistema de “pared verda”, sistema de construcción tradicional de la zona mediterránea [4], elementos de protección térmica con alta masa térmica y un nivel de transmitancia térmica bajo, aunque relativamente alto comparado con aislamientos modernos. La relación entre masa térmica y transmitancia térmica del BTC proporciona un aislamiento térmico para viviendas basado en un efecto temporal, debido a que si el elemento aislante tuviese una alta masa térmica y simultáneamente alta transmitancia térmica (elementos metálicos) el balance térmico se produciría rápidamente y no se conseguiría el efecto de aislamiento térmico temporal deseado, por otra parte si el elemento aislante tuviese una baja masa térmica y simultáneamente baja transmitancia térmica (aislamientos modernos) el balance térmico se conseguiría rápidamente y el aislamiento únicamente vendría proporcionado por la transmitancia térmica del material.

El debate entre protección térmica basado en únicamente transmitancia térmica y en elementos con inercia térmica está lejos de zanjarse en cuanto a mejor elemento de aislamiento de viviendas, debido principalmente a las ventajas que ambos proporcionan. En el caso de los aislamientos modernos, las necesidades de la instalación térmica son menores debido a la rápida velocidad con la que se consigue un balance térmico y la reducida pérdida con el exterior.

Aunque, la baja demanda energética de los sistemas de aislamiento modernos, alta resistencia y baja capacidad térmica, no se traduce un ahorro energético global debido a la rápida pérdida de dicho balance térmico por el uso de la zona aislada (pérdidas térmicas al abrir una puerta, ventana, etc.). Otra desventaja de los aislamientos modernos son los choques térmicos al que se expone a los usuarios de la zona protegida, la rápida velocidad con la que se establece un balance térmico tiene como efecto cambios bruscos de la temperatura de la zona, siendo este efecto muy contrario al confort térmico de los usuarios incluso llegando a producir enfermedades en los mismos (resfriados, laringitis, etc.) [5].

En el caso de los elementos de aislamiento basados en inercia térmica como medida de aislamiento térmico (aislamientos tradicionales, BTCs, mamposterías, etc.) el gradiente térmico al que se somete a los usuarios de la zona aislada es reducido, mejorando así sustancialmente el confort térmico de los usuarios. El proceso de conseguir dicho balance térmico tiene como contrapartida un consumo importante de energía por parte de los sistemas de climatización, aunque dicho consumo es prolongado en el tiempo lo cual permite la utilización de sistemas de

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

baja potencia y alto rendimiento, como calderas de baja temperatura, o sistemas de baja tecnología, como sistemas de combustión tradicional.

6.2 Instrumentación medida inercia térmica

Una vez conocido los usos y ventajas de la utilización de la inercia térmica como medida de aislamiento térmico de viviendas, se plantea la utilización de los instrumentos anteriormente desarrollados en la categorización y análisis de propiedades de inercia de un bloque de aislamiento.

Para esto, debemos establecer ciertas modificaciones en la metodología de medida y análisis del instrumento de caja caliente desarrollado en el presente trabajo. Una metodología capaz de analizar la respuesta en inercia de un bloque térmico debe trabajar en los rangos de funcionamiento de régimen transitorio, debido a que un régimen estacionario no proporcionaría las variables necesarias para la determinación de un valor de inercia térmica.

Para la determinación del parámetro de inercia térmica de un bloque de aislamiento se deben conocer múltiples variables características del mismo, como son la transmitancia térmica, la densidad aparente y el calor específico del elemento analizado. Como podemos observar en la Ecuación 16, k es el parámetro de transmitancia térmica (W/m^2K), ρ es el parámetro de densidad aparente (kg/m^3) y c es el parámetro de calor específico (J/kgK), por lo que el valor de inercia del elemento viene determinado por I ($J/m^2Ks^{1/2}$).

$$I = \sqrt{k * \rho * c} \quad (16)$$

La metodología anteriormente planteada ya es capaz de obtener tanto los valores de densidad aparente, pasos previos de la aplicación del ensayo, y de transmitancia térmica de un bloque de aislamiento, en función del flujo térmico en reposo y el gradiente térmico entre las caras expuestas. Por esto, se plantea una modificación de la metodología de caracterización desarrollada, siguiendo los principios de estimación simple de la inercia térmica [6], donde se incorporan los pasos y procesos necesarios para determinar el valor de calor específico de un bloque de aislamiento, de manera que dispongamos de todas las variables que determinan el factor de inercia térmica del bloque.

Como se ha expuesto anteriormente el valor de calor específico de un material, cantidad de calor necesaria para incrementar una cantidad másica de material un gradiente térmico determinado, debe analizarse en un régimen donde el flujo térmico que atraviesa la muestra a analizar no sea constante en función del tiempo y se conozca durante un periodo de tiempo t , tanto el flujo térmico como el gradiente térmico al que están expuestas las caras de la muestra.

Si establecemos un proceso de captura de datos en los periodos no estacionarios de caracterización de la muestra utilizando el instrumento de medición, principalmente en las zonas de análisis de arranque y parada expuestas en el planteamiento de la metodología, podemos determinar un valor de calor específico de muestra. Todo esto sin necesidad de capturar variables de caracterización adicionales, debido a que con la representación del flujo térmico, el gradiente térmico y los parámetros de funcionamiento del ensayo (Características del instrumento, peso y geometría de la muestra, etc.) podemos de manera analítica establecer un valor de calor específico de muestra suficientemente fiable.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

$$c = \frac{Q_{|abs|}}{(m * \Delta T)} \quad (17)$$

La Ecuación 17 establece el valor de calor específico (c) de un material en función del calor absorbido (Q_{abs}), la masa del elemento (m) y el incremento térmico (ΔT) producido en el elemento o material analizado en un periodo de tiempo determinado. Aunque, cabe considerar que el parámetro de calor específico de un material no es constante a diversas temperaturas, como observamos en la Ecuación 18 el parámetro Q_{abs} de un material con una masa determinada varía en función de las temperaturas iniciales y finales de medida.

$$Q_{|abs|} = m \int_{T_i}^{T_f} c dT \quad (18)$$

Como observábamos en la Ilustración 38 anteriormente expuesta, la metodología de caracterización planteada obtiene un valor instantáneo del flujo térmico que atraviesa la muestra de ensayo durante la duración del mismo. Aunque, este flujo térmico no es el utilizado en la caracterización de inercia térmica de un material, sino que se debe conocer el flujo térmico que absorbe la muestra y produce un incremento térmico en la misma.

Debido a que el flujo térmico suministrado en el experimento es conocido, potencia térmica emitida por la plancha caliente guardada, y como se ha comentado el valor capturado en el ensayo es el flujo térmico tras atravesar la muestra de material, el diferencial entre ambos es la cantidad de flujo absorbida por la misma y el utilizado en la determinación del calor específico.

$$F_{|abs|} = F - S * \varepsilon \quad (19)$$

Una vez conocido el flujo térmico absorbido por la muestra y analizando el tiempo necesario para que la misma incremente su temperatura en un grado centígrado, se obtiene el calor específico de la muestra en el rango de temperaturas en el que se ha capturado el tiempo. Como se ha expuesto, el calor específico de una muestra no es estable en función de la temperatura sino que varía en función del incremento de temperatura analizado, por esto y con el fin de mejorar la precisión de la medida, el valor final de calor específico se determina en función de diferentes medidas a lo largo de un rango térmico.

Estableciendo la temperatura mínima desde la que podemos analizar el tiempo de incremento de un grado centígrado como la temperatura inicial de la muestra, o temperatura ambiental en el caso de muestras no condicionadas. Y el rango térmico final entre la temperatura de establecimiento, o temperatura máxima que alcanza la muestra durante el ensayo, y un grado centígrado anterior. Así pues, la Ecuación 20 determina el valor de calor absorbido por la muestra en función del flujo térmico absorbido por la muestra ($F_{|abs|}$) y el tiempo de incremento térmico de un grado centígrado ($T_i - T_{i+1}$), entre los límites impuestos por la temperatura ambiental y la temperatura máxima de la muestra ($[1, n-1]$).

$$Q_{|abs|} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} F_{|abs|} * (T_i - T_{i+1})}{n} \quad (20)$$

La temperatura final o máxima que alcanza la muestra está determinada en función de dos variables, el flujo térmico suministrado y la transmitancia térmica del material analizado. Con el fin de mantener cierta continuidad de muestras entre análisis a distintos materiales y debido a

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

que el flujo suministrado es controlable y la transmitancia del material analizada, es posible establecer un rango de ciclos de análisis dentro del cual obtengamos valores representativos de la muestra.

Con el fin de determinar el número mínimo de ciclos necesarios para establecer un rango térmico entre temperatura inicial de la muestra y temperatura final a alcanzar por la misma, es necesario observar la variabilidad del calor específico normalizado de una muestra y el valor de calor específico obtenido por la presente metodología a lo largo de un gradiente térmico. El proceso de medida se repite hasta obtener la fiabilidad y precisión requerida en la aplicación del valor de inercia térmica en procesos constructivos.

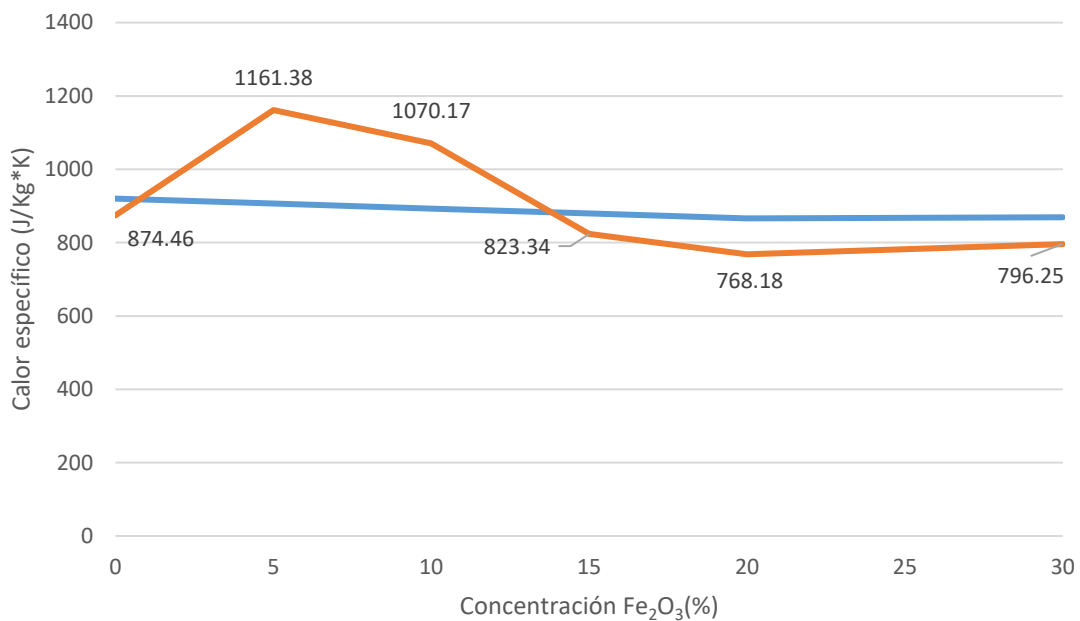


Ilustración 48. Evolución resultado calor específico en función de la carga térmica de la muestra.

La Ilustración 48 muestra la relación entre el valor de calor específico obtenido por la presente metodología entre una temperatura inicial de 22°C y una temperatura final o de establecimiento 36°C, de una muestra de mortero de cal del cual conocemos en concreto el valor de calor específico y se incrementa la concentración de Fe₂O₃ en su interior. En total se analizan seis muestras distintas del mismo material, siendo esta muestra un caso límite debido a la transmitancia térmica de la misma y el reducido rango térmico en el que se analiza (diferencial entre temperatura ambiente y temperatura final de muestra).

El análisis de la muestra de mortero de cal establece un número de ciclos de medición mínimo para muestras con una tipología similar, similar densidad y transmitancia térmica, con el que obtener una aproximación entre el valor conocido y medida de calor específico, que en este caso se sitúa en veinticinco ciclos. Con este número de ciclos mínimo obtenemos un percentil de desviación del valor de calor específico representativo en el uso final en sistemas constructivos o análisis térmicos.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

El valor de ciclos de análisis mínimo no se recomienda disminuir para mantener o mejorar la fiabilidad de las medidas obtenidas, aunque si se recomienda incrementar el mismo cuando se analizan muestras con una mayor densidad o mayor transmitancia térmica. Aunque, como se plantea en el proceso de captura, en el caso de necesitar valores con mayor fiabilidad se recomienda la calibración del instrumento con un elemento de características similares, el cual determine un número de ciclos representativo.

Con el fin de establecer un número de ciclos de incremento de un grado centígrado de la muestra, y debido a que el valor de transmitancia térmica de la misma es un valor preestablecido, disponemos de dos procesos. El primer paso para incrementar el número de ciclos al que exponemos a la muestra es el incremento de la temperatura a alcanzar por la muestra, dentro del rango de trabajo máximo del instrumento. Como se establece en la aplicación de la metodología del instrumento de caja natural de plancha caliente, la temperatura de equilibrio a alcanzar por las muestras se encuentra en 60°C, aunque como también se expone en el mismo la temperatura de trabajo del instrumento puede alcanzar temperaturas de hasta 80°C. El incremento de la temperatura máxima de funcionamiento del instrumento de caja natural de plancha caliente permite por lo tanto un incremento de hasta veinte ciclos de medición.

Otro procedimiento por el que es posible conseguir un mayor número de ciclos de análisis es el incremento del flujo térmico suministrado por la plancha caliente, este procedimiento debe realizarse únicamente en muestras con una alta resistencia térmica, lo cual conlleva una temperatura final de muestra muy inferior al valor límite de funcionamiento del instrumento. Con este procedimiento conseguimos incrementar el calor absorbido por la muestra y por consiguiente la temperatura máxima de establecimiento de la misma, incrementando a su vez el número de ciclos de medición disponibles.

El valor de temperatura máxima de funcionamiento del instrumento, en conjunto con el número mínimo de ciclos de medición, establece una temperatura máxima de la muestra. En el caso de disponer de una temperatura máxima de funcionamiento de 80°C y un número de ciclos de incremento de un grado centígrado mínimo de veinticinco ciclos, el valor de temperatura de muestra máximo es de 55°C. Salvo en casos extremos la temperatura máxima de muestra no se alcanzará si se acondiciona la muestra a temperatura ambiental, tal y como establece el proceso de caracterización del instrumento caja natural de plancha caliente.

Finalmente establecemos el proceso de caracterización necesario para establecer la inercia térmica de un material o sistema constructivo de manera fiable y minimizando posibles errores de caracterización. Los pasos establecidos para la caracterización térmica mediante caja natural de plancha caliente se mantienen en la caracterización de inercia, por lo que inicialmente se deben realizar todos los pasos requisitos de la misma, y seguidamente se aplica la presente metodología. Aunque no es recomendable, si los requisitos de fiabilidad requeridos por el ensayo son únicamente de carácter identificativo es posible utilizar los valores del análisis de transmitancia térmica.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Así pues, los pasos de aplicación de la metodología de caracterización de inercia térmica mediante el instrumento de caja natural de plancha caliente son los siguientes:

- Aplicación de la caracterización de transmitancia térmica.
- Determinación de la masa y densidad de muestra a analizar.
- Acondicionamiento de la muestra, temperatura y humedad ambiental.
- Determinación del número de ciclos de medición en función de la temperatura de establecimiento conseguida en el procedimiento de caracterización de transmitancia, acondicionamiento del instrumento al número mínimo de ciclos.
- Aplicación del proceso de determinación de transmitancia térmica con los nuevos valores establecidos.
- Análisis de resultados y determinación del valor de inercia térmica de muestra.

Referencias

- [1] N. Putzig (2006). "Thermal inertia SI unit proposal". Geophysics, Rice University, 1988. <https://nathaniel.putzig.com/research/dissertation/dissertation.pdf>.
- [2] L. Maldonado, F. Castilla, F. Vela, D. Rivera (2001). "Rendimiento y coste energético en la construcción de cerramientos de fábrica de adobe y bloque de tierra comprimida". Informes de la Construcción, <https://doi.org/10.3989/ic.2001.v53.i473.669>.
- [3] M. C. Jiménez, I. Cañas (2004). "Earth building in Spain". Construction and Building Materials, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.006>.
- [4] Julià, M. (2013). "Habitatges tradicionals: característiques arquitectòniques, tipològiques i constructives dels habitatges en sòl rústic a Mallorca". Disponible en: <https://scholar.google.es/scholar?q=Ballester%2C+M.+%282013%29.+Habitatges+tradicionals+-+Característiques+arquitectòniques%2C+tipològiques+i+constructives+del+habitatges+en+sòl+rústic+a+Mallorca.+Edicions+Universitat+de+les+Illes+Balears.+&btnG=&hl=en&as> (Acceso: 16 Mayo 2017).
- [5] JY. Son, M.L. Bell, JT. Lee. (2014). "The impact of heat, cold, and heat waves on hospital admissions in eight cities in Korea". Int J Biometeorol 58, 1893–1903 <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0791-y>
- [6] J. Wang, R. L. Bras, G. Sivandran, R. G. Knox (2010). "A simple method for the estimation of thermal inertia". Geophysical research letters, doi:10.1029/2009GL041851, 2010

Conclusiones

El ahorro energético en el ámbito de la construcción está distribuido en dos focos de actuación diferenciados. Por una parte, los sistemas activos en una vivienda (instalación climatización, generación ACS, etc.) y por otra parte el control térmico pasivo de la propia vivienda (aislamiento térmico, sistemas de inercia térmica, recuperación de calor, etc.). Uno de los problemas que principalmente se presenta, a técnicos y profesionales de la construcción, cuando se realiza una mejora o renovación en una vivienda existente es la cuantificación y caracterización de las medidas de ahorro energético presentes.

En el caso de los sistemas pasivos de la vivienda, y en concreto las propiedades de aislamiento térmico de los elementos de la vivienda, los procedimientos existentes para la caracterización y determinación de propiedades de un muro de aislamiento son caros, de difícil aplicación y con un tiempo de obtención de resultados muy superior a las necesidades de los interesados. Esta tesis presenta múltiples instrumentos que intentan otorgar valores de utilidad para la toma de decisiones por parte de técnicos y profesionales del ámbito de la construcción.

Actualmente los resultados científicos se centran en el desarrollo de sistemas con alta modularidad, mejorando los requisitos impuestos sobre las muestras a analizar tanto en el caso de hotbox como en mediciones in-situ, como el presentado en el trabajo realizado por Tullio de Rubeis [1]. Adicionalmente, encontramos otra vertiente de avance en sistemas que reducen sustancialmente el coste del propio instrumento, permitiendo una mejor penetración en el sector y mayor utilización por parte de profesionales, como en el trabajo de tesis doctoral de Sarah Seitz [2].

El trabajo aquí presentado intenta exponer procesos de caracterización térmica que mejoren tanto las restricciones impuestas en las metodologías de normativa sobre las muestras, como una reducción importante en el coste final del instrumento. Para esto se han diseñado tanto los procesos de aplicación y de análisis de datos, como todos los sistemas electrónicos de control utilizados. Desarrollar sistemas electrónicos propios, específicos a la función y con conocimiento de la aplicación a realizar, evitando la utilización de sistemas electrónicos genéricos “off-the-shelf” permite mejorar tanto la precisión como exactitud de los resultados.

Adicionalmente, la utilización de sistemas altamente conocidos permite obtener valores adicionales de respuesta térmica, que no sería posible obtener con la misma precisión con otros sistemas. Ejemplos de valores de captura adicionales los podemos encontrar en el análisis de la inercia térmica, donde la utilización de conversores ADC de instrumentación, y con una respuesta conocida, nos permite un conocimiento exhaustivo de los tiempos de reacción, siendo este uno de los factores de análisis más importantes en el mismo.

Aunque tanto los instrumentos como las metodologías de caracterización utilizadas son derivadas de las normativas técnicas, proporcionar una solución a las problemáticas presentes en los sistemas de caracterización térmica de materiales comerciales tiene un “coste” sobre la fiabilidad y precisión de los resultados. Aunque existe una pérdida de calidad en comparación con instrumentos comerciales, estos sistemas están diseñados para operar en un amplio rango de materiales con usos muy diversos (automoción, aeroespacial, etc.), al contrario que los instrumentos propuestos, los cuales se focalizan en la aplicación a materiales de construcción.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Con el fin de asegurar la validez de los valores obtenidos, en los casos donde no ha sido posible la cumplimentación total de las normativas aplicables, se analiza el impacto sobre fiabilidad y precisión de dichas desviaciones de la norma y se asegura que los valores obtenidos cumplen los requerimientos del campo de aplicación. El no cumplimiento de normativas aplicables conlleva la imposibilidad de certificación de los instrumentos desarrollados y la validación de sus resultados ante ciertos organismos. Por otra parte, proporciona a técnicos del sector información sobre las características de los materiales de trabajo que finalmente tiene un alto impacto en el consumo energético final de una vivienda, información que en la actualidad no se obtiene con medios comerciales.

El coste, tanto material como de aplicación, es uno de los aspectos en los que ambos instrumentos desarrollados permiten una mayor ventaja sobre otras posibles soluciones disponibles para la caracterización térmica de materiales y sistemas constructivos. En el caso de un técnico que no dispone de un sistema de caracterización de materiales, el coste de utilización de un sistema comercial se encuentra entre los \$6000 y \$20000 [2], comparándolo con el coste de la caja natural de plancha caliente desarrollada supone un incremento del 1,000%, y en el caso de que se desee disponer del instrumento para su utilización propia el coste material de un sistema comercial es de hasta 10,000% más que el coste del instrumento desarrollado.

Siendo el valor añadido del instrumento de caracterización insitu aún mayor debido a la posibilidad de obtener caracterizaciones térmicas en elementos no reproducibles (Edificios históricos, etc.) donde no es posible obtener muestras del material, y por lo tanto se dificulta la aplicación de sistemas comerciales de caracterización térmica.

En el Anejo 6 es posible observar un ejemplo de caracterización rápida, mediante caja natural de plancha caliente, realizado para un técnico de edificación. En el informe realizado es posible observar una mejoría en relación con el valor estándar dispuesto en el CTE para un mortero de cemento de densidad 2000 kg/m³ aprox., establecido en 1.3 W/m*K.

Conocer las necesidades del ámbito de aplicación permite a su vez el desarrollo de instrumentos de caracterización que se adapten a las necesidades del mismo y permitan una sencilla aplicación del procedimiento. Ambos instrumentos se han desarrollado con unos requisitos de movilidad, sin la necesidad de disponer de un laboratorio o centro de realización de ensayos, la sencillez de aplicación, permitiendo el uso de los mismos por parte de un técnico no especializado, y la robustez de los mismos.

Una vez desarrollados los instrumentos y determinadas tanto sus características como la metodología de aplicación de los mismos, se analizan aplicaciones adicionales del sistema como ejemplos de aplicación real de los mismos. El análisis de la inercia térmica de un muro de aislamiento, aunque no se contempla como uno de los requerimientos de la presente tesis, se analiza mediante los resultados obtenidos de la caracterización térmica mediante la caja natural de plancha caliente. Esta propiedad, aunque no utilizable en la actualidad como un factor de diseño en el ámbito de la construcción, tiene un importante impacto sobre el confort interior de viviendas y por lo tanto es de importancia y utilidad para un técnico interesado.

Finalmente, se analiza la aplicabilidad de los instrumentos desarrollados, así como la metodología de aplicación dispuesta para los mismos, en diferentes casos propuestos que contemplen las diferentes posibilidades típicas en las que se dará uso a los diferentes sistemas. Los casos de aplicación analizados y expuestos en la tesis contemplan las siguientes necesidades:

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

- Desarrollo de un material o sistema constructivo, en el caso de que un técnico decida utilizar un material del cual no dispone de sus características térmicas o la utilización de diferentes materiales conocidos como componentes de un sistema constructivo complejo hace que no se conozcan los valores característicos térmicos finales del mismo.
- Confirmación de los valores de diseño utilizados, un técnico que aun utilizando materiales conocidos desea comprobar el valor real de propiedades térmicas tanto de los elementos complejos diseñados. Adicionalmente se debe confirmar que tanto el valor teórico como el valor caracterizado del elemento desarrollado se mantienen una vez finalizada la construcción de la vivienda, obteniendo unas características térmicas finales reales del bloque de aislamiento similar a las previstas.
- Utilización de los conocimientos tanto de la transmitancia como de la inercia térmica para mejorar el confort interior de una vivienda. Conocer las propiedades de una vivienda permite determinar condiciones de uso ideales y el desarrollo de sistemas de aviso a usuarios para mejora del confort interior.

Referencias

- [1] Tullio de Rubeis, Mirco Muttillio, Iole Nardi, Leonardo Pantoli, Vincenzo Stornelli and Dario Ambrosini, "Integrated Measuring and Control System for Thermal Analysis of Buildings Components in Hot Box Experiments", *Energies*, 2019, <https://doi.org/10.3390/en12112053>
- [2] S Seitz, C MacDougall, "Design of an Affordable Hot Box Testing Apparatus", *Proceedings of the 16th NOCMAT Non-Conventional Materials and Technologies*, Winnipeg, MB, Canada, 2015

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Índice de ilustraciones:

| | |
|---|----|
| Ilustración 1. Ejemplo de las diferentes capas que componen un muro “pared verda”. 1) Mortero exterior de cal con espesor aprox. 0.02m, 2) Piedra caliza con espesor aprox. 0.25m, 3) Núcleo central de arcilla con espesor aprox. 0.10m, 4) Piedra caliza con espesor aprox. 0.25m, 5) Yeso de refinado con espesor aprox. 0.01m. Imagen propia. | 21 |
| Ilustración 2. Pasos de aplicación de la metodología de caracterización térmica mediante capas homogéneas. Imagen propia. | 23 |
| Ilustración 3. Relación entre el valor de transmitancia térmica y la densidad del material, para el caso de un hormigón con áridos ligeros. Imagen obtenida de: http://cte-web.iccl.es | 24 |
| Ilustración 4. Pasos de aplicación de la metodología de caracterización térmica mediante capas heterogéneas. Imagen propia. | 26 |
| Ilustración 5. Instrumento caja caliente para la caracterización térmica de muros y ventanas. Imagen propiedad de Oak Ridge National Laboratory. | 29 |
| Ilustración 6. Esquema de aplicación del instrumento dispuesto en la normativa ISO 8990:1994. Imagen propiedad de ISO. | 32 |
| Ilustración 7. Detalle del encuentro entre la muestra analizada y el instrumento dispuesto en la normativa ISO 8990:1994. Imagen propiedad de ISO. | 33 |
| Ilustración 8. Esquema colocación capas interiores del instrumento siguiendo normativa ISO 8302:1991. Imagen propiedad de ISO. | 35 |
| Ilustración 9. Ejemplos de aplicación de la normativa ISO 8301:1991, para los casos donde únicamente se disponga de una muestra y un transductor de flujo, dos muestras y un transductor, o una muestra y dos transductores. Imagen propiedad de ISO. | 37 |
| Ilustración 10. Ejemplo sistema comercial caja caliente NETZSCH GHP 456 Titan. Imagen propiedad de Netzsch. | 42 |
| Ilustración 11. Variables de captura caja natural de plancha caliente. Imagen propia. | 44 |
| Ilustración 12. Partes Hot-box, imagen propiedad de ISO. | 45 |
| Ilustración 13. Partes Hot-box propuesta. Imagen propia. | 46 |
| Ilustración 14. Cartelería de advertencia riesgo quemadura. Imagen propia. | 47 |
| Ilustración 15. Sección pared caja natural, recubrimiento poliuretano y núcleo poliestireno expandido. Imagen propia. | 49 |
| Ilustración 16. Caja Natural con configuración modular. Imagen propia. | 50 |
| Ilustración 17. Cuerpo Caja natural en proceso de fabricación. Imagen propia. | 51 |
| Ilustración 18. Detalle sensor HFPO1-05 y aislamiento de perlas EPS. Imagen propia. | 52 |
| Ilustración 19. Resistencia plana sobre pcb, utilizada como elemento térmico y denominado plancha caliente. Imagen propia. | 53 |
| Ilustración 20. Esquema del tratamiento de la señal de flujo térmico capturada, desde el transductor hasta la obtención de un valor digital. | 57 |
| Ilustración 21. Perdidas laterales a la caja natural de plancha caliente en función del rango térmico utilizado. | 60 |
| Ilustración 22. Muestra objetivo de viruta de madera compactada, con características y respuesta térmica conocida. Imagen propiedad de Socyr. | 62 |
| Ilustración 23. Muestras para ensayo en caja natural de plancha caliente de marés proveniente de canteras mallorquinas. Imagen propia. | 63 |
| Ilustración 24. Muestra para ensayo en caja natural de plancha caliente de barro-paja. Imagen propia. | 65 |

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

| | |
|---|-----|
| Ilustración 25. Muestra para ensayo en caja natural de plancha caliente de mortero de cal con aditivo de hueso de sepia. Imagen propia. | 66 |
| Ilustración 26. Muestra mortero de cal con aditivo Fe_2O_3 del 20%. Imagen propia..... | 67 |
| Ilustración 27. Relación entre el porcentaje de aditivo y conductividad de la muestra. | 68 |
| Ilustración 28. Posidonia Oceánica. Imagen propiedad de wikimedia. | 69 |
| Ilustración 29. Sensor térmico introducido en muestra de posidonia oceánica compactada. Imagen propia. | 70 |
| Ilustración 30. Detalle sección de las capas que componen el sistema constructivo de cubierta. | 72 |
| Ilustración 31. Resultados vivienda orientación de fachada sur. En negro la temperatura superficial interior a la vivienda, en rojo la temperatura del cerramiento en la superficie exterior y en azul la temperatura ambiental exterior. | 74 |
| Ilustración 32. Resultados vivienda con uso inadecuado de los sistemas de ventilación y climatización. En morado la temperatura superficial interior a la vivienda, en rojo la temperatura del cerramiento en la superficie exterior y en azul la temperatura ambiental exterior. | 75 |
| Ilustración 33. Ejemplo de temperaturas superficiales de orientación Sur y cubierta, temperatura interior y ambiental de un elemento expuesto al exterior. | 78 |
| Ilustración 34. Ejemplo de aplicación de los sensores de la cara “fría” o interior del instrumento de caracterización insitu desarrollado. | 80 |
| Ilustración 35. Caja eléctrica estanca de la marca Schneider con protección IP55, utilizada para el encapsulado de los componentes electrónicos. | 81 |
| Ilustración 36. Esquema del sensor de flujo térmico y la polaridad interior del mismo. | 82 |
| Ilustración 37. Sensor HFPO1-05 de la marca Hukseflux utilizado para la captura del flujo térmico, donde podemos observar la cara expuesta a la zona “caliente” (izquierda) y zona “fría” (derecha). Imagen propiedad de Hukseflux..... | 82 |
| Ilustración 38. Valores de flujo térmico capturados y tratados por el sistema de prefiltrado digital..... | 84 |
| Ilustración 39. Relación entre señal analógica y señal convertida digital en la aplicación de un conversor ADC..... | 87 |
| Ilustración 40. Instrumento Breeze, 1) elemento exterior de caracterización, 2) elemento interior de caracterización, 3) módulo de información al usuario..... | 89 |
| Ilustración 41. Ejemplo aplicación normativa ASHRAE 55-2017. | 90 |
| Ilustración 42. Diagrama de flujo modulo interior de caracterización Breeze. | 93 |
| Ilustración 43. PCB modular de captura y tratamiento de datos, utilizada tanto en el dispositivo interior como exterior. | 94 |
| Ilustración 44. Acopio de componentes para la fabricación de los instrumentos Breeze. Imagen propia. | 95 |
| Ilustración 45. Módulo de información Breeze. Imagen propia..... | 97 |
| Ilustración 46. PCB del módulo de información de Breeze. | 98 |
| Ilustración 47. Esquema de utilización de la inercia térmica como elemento de resistencia térmica. | 102 |
| Ilustración 48. Evolución resultado calor específico en función de la carga térmica de la muestra. | 106 |

Índice de tablas:

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Consumo energético medio de una vivienda por uso. Tabla obtenida de “Consumos del Sector Residencial en España Resumen de Información Básica” [1] | 12 |
| Tabla 2. Temperaturas de trabajo caja natural de plancha caliente. | 48 |
| Tabla 3. Límites de trabajo y material fungible necesario. | 48 |
| Tabla 4. Coste material construcción caja natural de plancha caliente. | 54 |
| Tabla 5. Coste fungibles de utilización..... | 55 |
| Tabla 6. Relación entre el flujo térmico medido en la muestra y el flujo térmico de pérdidas lateral, dependiendo de la exposición interior al foco térmico..... | 60 |
| Tabla 7. Resultados análisis materiales de origen natural..... | 61 |
| Tabla 8. Resultado análisis material de características térmicas conocidas..... | 62 |
| Tabla 9. Resultados análisis Caja natural de plancha caliente..... | 65 |
| Tabla 10. Valores de transmitancia térmica Posidonia Oceánica a diversas densidades..... | 71 |

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Anexos

Anexo 1 – Artículo: Comparative analysis of thermal characterization methodologies of a historical double leaf masonry wall

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Anexo 2 – Artículo: Posidonia Oceanica as thermal insulation: Determination of the minimum bulk density, according to project specifications, for its use as a building solution on a flat roof.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Anexo 3 – Artículo: Instrumentación de caracterización térmica rápida de elementos y sistemas constructivos.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Anexo 4 – Instrucciones de montaje y uso BREEZE.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Anexo 5 – Muestra datos caja natural de plancha caliente.

Valores resultados de un análisis de cinco materiales de construcción compuestos, los cuales comparten la misma base de material y un porcentaje de aditivo de mezcla distinto. En el caso presente se trata de una muestra de mortero de cal, con un aditivo ferroso puro, en concreto Fe₂O₂ con una pureza superior al 95%.

| Muestra | Calor específico (J/Kg*K) | Valores U (W/m ² K) | L muestra (m) |
|---------|---------------------------|--------------------------------|---------------|
| M0(0%) | 1292,564414 | 10,8634 | 0,125 |
| M1(5%) | 1161,384376 | 9,5146 | 0,125 |
| M2(10%) | 1070,16575 | 9,1172 | 0,125 |

| Muestra | Valor Y (W/mK) | Pendiente Bajada |
|---------|----------------|------------------|
| M0(0%) | 1,357925 | 125,9133 |
| M1(5%) | 1,189325 | 130,1407 |
| M2(10%) | 1,13965 | 130,493 |

Valores resultados de un análisis de tres materiales de construcción compuestos, los cuales comparten la misma base de material y un porcentaje de aditivo de mezcla distinto (0%, 5% y 10%). En el caso presente se trata de una muestra de mortero de cal, con un aditivo ferroso puro, en concreto Fe₂O₂ con una pureza superior al 95%.

Únicamente se muestra en forma de ejemplo los 250 primeros valores capturados por la caja natural de plancha caliente, aunque en el breve periodo de análisis expuesto ya es posible detectar el incremento de temperatura de la plancha y el inicio del paso de flujo térmico a través de la muestra.

| T0(0%) | T0(5%) | T0(10%) | T1(0%) | T1(5%) | T1(10%) | F(0%) | F(5%) | F(10%) |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|----------|
| 61,4366 | 61,4067 | 61,5778 | 20,4313 | 15,5661 | 15,3161 | 6,1572 | -8,1297 | -12,1130 |
| 61,2194 | 61,5412 | 61,5835 | 20,4314 | 15,5664 | 15,3164 | 6,1435 | -8,1284 | -12,1041 |
| 61,3273 | 61,6013 | 61,4452 | 20,4315 | 15,5666 | 15,3166 | 6,1297 | -8,1271 | -12,0952 |
| 61,6171 | 61,2289 | 61,4700 | 20,4316 | 15,5669 | 15,3169 | 6,1159 | -8,1258 | -12,0862 |
| 61,4298 | 61,5851 | 61,3371 | 20,4317 | 15,5671 | 15,3171 | 6,1022 | -8,1245 | -12,0773 |
| 61,4806 | 61,5049 | 61,3834 | 20,4318 | 15,5674 | 15,3174 | 6,0884 | -8,1232 | -12,0684 |
| 61,5713 | 61,4122 | 61,5010 | 20,4318 | 15,5676 | 15,3176 | 6,0747 | -8,1219 | -12,0595 |
| 61,3373 | 61,3217 | 61,3992 | 20,4319 | 15,5679 | 15,3179 | 6,0610 | -8,1205 | -12,0505 |
| 61,4102 | 61,4183 | 61,3140 | 20,4320 | 15,5681 | 15,3181 | 6,0473 | -8,1192 | -12,0416 |
| 61,4694 | 61,4830 | 61,6201 | 20,4321 | 15,5684 | 15,3184 | 6,0336 | -8,1179 | -12,0327 |
| 61,4445 | 61,5429 | 61,2928 | 20,4322 | 15,5687 | 15,3187 | 6,0199 | -8,1165 | -12,0237 |
| 61,2866 | 61,2890 | 61,4549 | 20,4323 | 15,5689 | 15,3189 | 6,0062 | -8,1152 | -12,0148 |
| 61,5023 | 61,3652 | 61,7076 | 20,4324 | 15,5692 | 15,3192 | 5,9925 | -8,1139 | -12,0058 |
| 61,5205 | 61,3720 | 61,2757 | 20,4324 | 15,5694 | 15,3194 | 5,9789 | -8,1125 | -11,9968 |
| 61,5895 | 61,7028 | 61,5389 | 20,4325 | 15,5697 | 15,3197 | 5,9652 | -8,1111 | -11,9879 |
| 61,2283 | 61,5147 | 61,4333 | 20,4326 | 15,5699 | 15,3199 | 5,9516 | -8,1098 | -11,9789 |

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

| | | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|----------|
| 61,3024 | 61,4790 | 61,5876 | 20,4327 | 15,5702 | 15,3202 | 5,9380 | -8,1084 | -11,9699 |
| 61,5546 | 61,6596 | 61,6770 | 20,4328 | 15,5705 | 15,3205 | 5,9244 | -8,1070 | -11,9610 |
| 61,3312 | 61,5082 | 61,3557 | 20,4329 | 15,5707 | 15,3207 | 5,9108 | -8,1056 | -11,9520 |
| 61,5425 | 61,5145 | 61,4041 | 20,4330 | 15,5710 | 15,3210 | 5,8972 | -8,1042 | -11,9430 |
| 61,4493 | 61,3462 | 61,6432 | 20,4331 | 15,5712 | 15,3212 | 5,8836 | -8,1028 | -11,9340 |
| 61,2246 | 61,4184 | 61,6107 | 20,4331 | 15,5715 | 15,3215 | 5,8701 | -8,1014 | -11,9250 |
| 61,5534 | 61,3242 | 61,2349 | 20,4332 | 15,5717 | 15,3217 | 5,8565 | -8,1000 | -11,9160 |
| 61,2118 | 61,4164 | 61,5940 | 20,4333 | 15,5720 | 15,3220 | 5,8430 | -8,0986 | -11,9070 |
| 61,4469 | 61,4361 | 61,6255 | 20,4334 | 15,5723 | 15,3223 | 5,8295 | -8,0972 | -11,8980 |
| 61,3564 | 61,6374 | 61,4711 | 20,4335 | 15,5725 | 15,3225 | 5,8159 | -8,0957 | -11,8890 |
| 61,3339 | 61,4964 | 61,5615 | 20,4336 | 15,5728 | 15,3228 | 5,8024 | -8,0943 | -11,8799 |
| 61,6357 | 61,3056 | 61,5313 | 20,4337 | 15,5730 | 15,3230 | 5,7889 | -8,0928 | -11,8709 |
| 61,2014 | 61,3133 | 61,6628 | 20,4338 | 15,5733 | 15,3233 | 5,7755 | -8,0914 | -11,8619 |
| 61,3786 | 61,2714 | 61,3779 | 20,4339 | 15,5736 | 15,3236 | 5,7620 | -8,0899 | -11,8528 |
| 61,3971 | 61,5511 | 61,5207 | 20,4339 | 15,5738 | 15,3238 | 5,7485 | -8,0885 | -11,8438 |
| 61,4967 | 61,3783 | 61,6927 | 20,4340 | 15,5741 | 15,3241 | 5,7351 | -8,0870 | -11,8348 |
| 61,5013 | 61,5405 | 61,5072 | 20,4341 | 15,5743 | 15,3243 | 5,7216 | -8,0855 | -11,8257 |
| 61,3943 | 61,5819 | 61,3625 | 20,4342 | 15,5746 | 15,3246 | 5,7082 | -8,0841 | -11,8167 |
| 61,8019 | 61,3775 | 61,4845 | 20,4343 | 15,5749 | 15,3249 | 5,6948 | -8,0826 | -11,8076 |
| 61,5220 | 61,3429 | 61,7081 | 20,4344 | 15,5751 | 15,3251 | 5,6814 | -8,0811 | -11,7985 |
| 61,6619 | 61,6244 | 61,2854 | 20,4345 | 15,5754 | 15,3254 | 5,6680 | -8,0796 | -11,7895 |
| 61,6430 | 61,6640 | 61,7184 | 20,4346 | 15,5756 | 15,3256 | 5,6546 | -8,0781 | -11,7804 |
| 61,6762 | 61,3411 | 61,6334 | 20,4347 | 15,5759 | 15,3259 | 5,6413 | -8,0766 | -11,7713 |
| 61,7930 | 61,4484 | 61,5919 | 20,4348 | 15,5762 | 15,3262 | 5,6279 | -8,0750 | -11,7623 |
| 61,3723 | 61,3537 | 61,4350 | 20,4349 | 15,5764 | 15,3264 | 5,6146 | -8,0735 | -11,7532 |
| 61,7094 | 61,6525 | 61,5179 | 20,4349 | 15,5767 | 15,3267 | 5,6012 | -8,0720 | -11,7441 |
| 61,5015 | 61,5583 | 61,5472 | 20,4350 | 15,5769 | 15,3269 | 5,5879 | -8,0705 | -11,7350 |
| 61,5359 | 61,6610 | 61,6363 | 20,4351 | 15,5772 | 15,3272 | 5,5746 | -8,0689 | -11,7259 |
| 61,4740 | 61,6210 | 61,4763 | 20,4352 | 15,5775 | 15,3275 | 5,5613 | -8,0674 | -11,7168 |
| 61,5780 | 61,6130 | 61,5212 | 20,4353 | 15,5777 | 15,3277 | 5,5480 | -8,0658 | -11,7077 |
| 61,5416 | 61,4883 | 61,7122 | 20,4354 | 15,5780 | 15,3280 | 5,5347 | -8,0643 | -11,6986 |
| 61,4155 | 61,5992 | 61,7553 | 20,4355 | 15,5783 | 15,3283 | 5,5215 | -8,0627 | -11,6895 |
| 61,2072 | 61,4516 | 61,4220 | 20,4356 | 15,5785 | 15,3285 | 5,5082 | -8,0611 | -11,6803 |
| 61,6572 | 61,7537 | 61,5409 | 20,4357 | 15,5788 | 15,3288 | 5,4950 | -8,0595 | -11,6712 |
| 61,5356 | 61,5958 | 61,1968 | 20,4358 | 15,5791 | 15,3291 | 5,4817 | -8,0580 | -11,6621 |
| 61,5313 | 61,8060 | 61,3584 | 20,4359 | 15,5793 | 15,3293 | 5,4685 | -8,0564 | -11,6529 |
| 61,5210 | 61,6120 | 61,5497 | 20,4360 | 15,5796 | 15,3296 | 5,4553 | -8,0548 | -11,6438 |
| 61,4678 | 61,8191 | 61,5951 | 20,4361 | 15,5798 | 15,3298 | 5,4421 | -8,0532 | -11,6347 |
| 61,3994 | 61,4859 | 61,2331 | 20,4362 | 15,5801 | 15,3301 | 5,4289 | -8,0515 | -11,6255 |
| 61,4594 | 61,7614 | 61,3787 | 20,4363 | 15,5804 | 15,3304 | 5,4158 | -8,0499 | -11,6164 |
| 61,6022 | 61,5466 | 61,7006 | 20,4364 | 15,5806 | 15,3306 | 5,4026 | -8,0483 | -11,6072 |
| 61,6206 | 61,6229 | 61,4543 | 20,4365 | 15,5809 | 15,3309 | 5,3894 | -8,0467 | -11,5980 |
| 61,6663 | 61,7429 | 61,7884 | 20,4366 | 15,5812 | 15,3312 | 5,3763 | -8,0451 | -11,5889 |
| 61,5665 | 61,5394 | 61,4602 | 20,4367 | 15,5814 | 15,3314 | 5,3632 | -8,0434 | -11,5797 |

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

| | | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|----------|
| 61,4855 | 61,2556 | 61,5988 | 20,4367 | 15,5817 | 15,3317 | 5,3500 | -8,0418 | -11,5705 |
| 61,4567 | 61,5099 | 61,4697 | 20,4368 | 15,5820 | 15,3320 | 5,3369 | -8,0401 | -11,5614 |
| 61,5233 | 61,2640 | 61,2898 | 20,4369 | 15,5822 | 15,3322 | 5,3238 | -8,0385 | -11,5522 |
| 61,2639 | 61,5904 | 61,2671 | 20,4370 | 15,5825 | 15,3325 | 5,3108 | -8,0368 | -11,5430 |
| 61,6000 | 61,5371 | 61,4866 | 20,4371 | 15,5828 | 15,3328 | 5,2977 | -8,0351 | -11,5338 |
| 61,7096 | 61,4454 | 61,3535 | 20,4372 | 15,5830 | 15,3330 | 5,2846 | -8,0334 | -11,5246 |
| 61,4725 | 61,4798 | 61,5492 | 20,4373 | 15,5833 | 15,3333 | 5,2716 | -8,0318 | -11,5154 |
| 61,4302 | 61,4409 | 61,4153 | 20,4374 | 15,5836 | 15,3336 | 5,2585 | -8,0301 | -11,5062 |
| 61,5900 | 61,2156 | 61,5282 | 20,4375 | 15,5838 | 15,3338 | 5,2455 | -8,0284 | -11,4970 |
| 61,4878 | 61,6513 | 61,5729 | 20,4376 | 15,5841 | 15,3341 | 5,2325 | -8,0267 | -11,4878 |
| 61,5776 | 61,5505 | 61,3770 | 20,4377 | 15,5844 | 15,3344 | 5,2195 | -8,0250 | -11,4785 |
| 61,3489 | 61,6769 | 61,6204 | 20,4378 | 15,5846 | 15,3346 | 5,2065 | -8,0233 | -11,4693 |
| 61,6037 | 61,2770 | 61,4633 | 20,4379 | 15,5849 | 15,3349 | 5,1935 | -8,0215 | -11,4601 |
| 61,2334 | 61,5493 | 61,4037 | 20,4380 | 15,5852 | 15,3352 | 5,1806 | -8,0198 | -11,4508 |
| 61,4452 | 61,6025 | 61,4725 | 20,4381 | 15,5854 | 15,3354 | 5,1676 | -8,0181 | -11,4416 |
| 61,7606 | 61,2300 | 61,2466 | 20,4382 | 15,5857 | 15,3357 | 5,1547 | -8,0163 | -11,4324 |
| 61,3650 | 61,6270 | 61,3727 | 20,4383 | 15,5860 | 15,3360 | 5,1417 | -8,0146 | -11,4231 |
| 61,3555 | 61,4417 | 61,2313 | 20,4384 | 15,5862 | 15,3362 | 5,1288 | -8,0128 | -11,4139 |
| 61,7056 | 61,3440 | 61,3256 | 20,4385 | 15,5865 | 15,3365 | 5,1159 | -8,0111 | -11,4046 |
| 61,6045 | 61,4908 | 61,5748 | 20,4386 | 15,5868 | 15,3368 | 5,1030 | -8,0093 | -11,3953 |
| 61,5104 | 61,3400 | 61,7643 | 20,4387 | 15,5870 | 15,3370 | 5,0901 | -8,0076 | -11,3861 |
| 61,5159 | 61,5280 | 61,6717 | 20,4388 | 15,5873 | 15,3373 | 5,0772 | -8,0058 | -11,3768 |
| 61,4574 | 61,4680 | 61,5370 | 20,4389 | 15,5876 | 15,3376 | 5,0643 | -8,0040 | -11,3675 |
| 61,4793 | 61,3505 | 61,4091 | 20,4390 | 15,5878 | 15,3378 | 5,0515 | -8,0022 | -11,3583 |
| 61,6490 | 61,3341 | 61,5037 | 20,4391 | 15,5881 | 15,3381 | 5,0386 | -8,0004 | -11,3490 |
| 61,5437 | 61,4383 | 61,5559 | 20,4392 | 15,5884 | 15,3384 | 5,0258 | -7,9986 | -11,3397 |
| 61,7027 | 61,4485 | 61,6433 | 20,4393 | 15,5887 | 15,3387 | 5,0130 | -7,9968 | -11,3304 |
| 61,7351 | 61,2172 | 61,4370 | 20,4394 | 15,5889 | 15,3389 | 5,0002 | -7,9950 | -11,3211 |
| 61,5647 | 61,5963 | 61,5105 | 20,4396 | 15,5892 | 15,3392 | 4,9874 | -7,9932 | -11,3118 |
| 61,4845 | 61,4964 | 61,5392 | 20,4397 | 15,5895 | 15,3395 | 4,9746 | -7,9914 | -11,3025 |
| 61,4738 | 61,4326 | 61,5013 | 20,4398 | 15,5897 | 15,3397 | 4,9618 | -7,9895 | -11,2932 |
| 61,5333 | 61,3977 | 61,7388 | 20,4399 | 15,5900 | 15,3400 | 4,9491 | -7,9877 | -11,2839 |
| 61,4009 | 61,5502 | 61,3525 | 20,4400 | 15,5903 | 15,3403 | 4,9363 | -7,9858 | -11,2745 |
| 61,5270 | 61,3557 | 61,2369 | 20,4401 | 15,5906 | 15,3406 | 4,9236 | -7,9840 | -11,2652 |
| 61,4958 | 61,5607 | 61,2869 | 20,4402 | 15,5908 | 15,3408 | 4,9108 | -7,9821 | -11,2559 |
| 61,5360 | 61,5210 | 61,4776 | 20,4403 | 15,5911 | 15,3411 | 4,8981 | -7,9803 | -11,2465 |
| 61,4238 | 61,4759 | 61,7206 | 20,4404 | 15,5914 | 15,3414 | 4,8854 | -7,9784 | -11,2372 |
| 61,4103 | 61,6264 | 61,4039 | 20,4405 | 15,5916 | 15,3416 | 4,8727 | -7,9765 | -11,2279 |
| 61,6345 | 61,4434 | 61,6424 | 20,4406 | 15,5919 | 15,3419 | 4,8600 | -7,9747 | -11,2185 |
| 61,4889 | 61,2954 | 61,6412 | 20,4407 | 15,5922 | 15,3422 | 4,8473 | -7,9728 | -11,2092 |
| 61,2929 | 61,4896 | 61,6400 | 20,4408 | 15,5925 | 15,3425 | 4,8347 | -7,9709 | -11,1998 |
| 61,5801 | 61,4810 | 61,4698 | 20,4409 | 15,5927 | 15,3427 | 4,8220 | -7,9690 | -11,1904 |
| 61,6534 | 61,5415 | 61,4159 | 20,4410 | 15,5930 | 15,3430 | 4,8094 | -7,9671 | -11,1811 |
| 61,4943 | 61,6644 | 61,5701 | 20,4411 | 15,5933 | 15,3433 | 4,7968 | -7,9652 | -11,1717 |

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

| | | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|----------|
| 61,5145 | 61,2600 | 61,5662 | 20,4412 | 15,5935 | 15,3435 | 4,7841 | -7,9633 | -11,1623 |
| 61,3692 | 61,6803 | 61,4894 | 20,4413 | 15,5938 | 15,3438 | 4,7715 | -7,9613 | -11,1530 |
| 61,7209 | 61,4510 | 61,6037 | 20,4414 | 15,5941 | 15,3441 | 4,7589 | -7,9594 | -11,1436 |
| 61,4441 | 61,4379 | 61,7183 | 20,4416 | 15,5944 | 15,3444 | 4,7464 | -7,9575 | -11,1342 |
| 61,4598 | 61,3865 | 61,2737 | 20,4417 | 15,5946 | 15,3446 | 4,7338 | -7,9555 | -11,1248 |
| 61,6236 | 61,6632 | 61,6319 | 20,4418 | 15,5949 | 15,3449 | 4,7212 | -7,9536 | -11,1154 |
| 61,3977 | 61,4402 | 61,6466 | 20,4419 | 15,5952 | 15,3452 | 4,7087 | -7,9516 | -11,1060 |
| 61,3982 | 61,4649 | 61,5354 | 20,4420 | 15,5955 | 15,3455 | 4,6962 | -7,9497 | -11,0966 |
| 61,5430 | 61,6408 | 61,3063 | 20,4421 | 15,5957 | 15,3457 | 4,6836 | -7,9477 | -11,0872 |
| 61,5487 | 61,3205 | 61,3922 | 20,4422 | 15,5960 | 15,3460 | 4,6711 | -7,9457 | -11,0778 |
| 61,4704 | 61,2001 | 61,5341 | 20,4423 | 15,5963 | 15,3463 | 4,6586 | -7,9438 | -11,0683 |
| 61,4437 | 61,5806 | 61,5361 | 20,4424 | 15,5966 | 15,3466 | 4,6461 | -7,9418 | -11,0589 |
| 61,5197 | 61,6137 | 61,6567 | 20,4425 | 15,5968 | 15,3468 | 4,6336 | -7,9398 | -11,0495 |
| 61,3732 | 61,3319 | 61,6361 | 20,4426 | 15,5971 | 15,3471 | 4,6212 | -7,9378 | -11,0400 |
| 61,2844 | 61,5086 | 61,6597 | 20,4428 | 15,5974 | 15,3474 | 4,6087 | -7,9358 | -11,0306 |
| 61,6525 | 61,4142 | 61,4407 | 20,4429 | 15,5977 | 15,3477 | 4,5963 | -7,9338 | -11,0212 |
| 61,2504 | 61,4816 | 61,3977 | 20,4430 | 15,5979 | 15,3479 | 4,5838 | -7,9318 | -11,0117 |
| 61,3919 | 61,5094 | 61,5974 | 20,4431 | 15,5982 | 15,3482 | 4,5714 | -7,9297 | -11,0023 |
| 61,2872 | 61,8167 | 61,5804 | 20,4432 | 15,5985 | 15,3485 | 4,5590 | -7,9277 | -10,9928 |
| 61,6105 | 61,4906 | 61,4231 | 20,4433 | 15,5988 | 15,3488 | 4,5466 | -7,9257 | -10,9834 |
| 61,3153 | 61,7325 | 61,5567 | 20,4434 | 15,5991 | 15,3491 | 4,5342 | -7,9236 | -10,9739 |
| 61,7107 | 61,4755 | 61,5854 | 20,4435 | 15,5993 | 15,3493 | 4,5218 | -7,9216 | -10,9644 |
| 61,5411 | 61,6811 | 61,3326 | 20,4436 | 15,5996 | 15,3496 | 4,5095 | -7,9196 | -10,9549 |
| 61,5651 | 61,7048 | 61,6044 | 20,4438 | 15,5999 | 15,3499 | 4,4971 | -7,9175 | -10,9455 |
| 61,7693 | 61,5532 | 61,3874 | 20,4439 | 15,6002 | 15,3502 | 4,4848 | -7,9154 | -10,9360 |
| 61,5235 | 61,5213 | 61,5162 | 20,4440 | 15,6004 | 15,3504 | 4,4724 | -7,9134 | -10,9265 |
| 61,3690 | 61,5043 | 61,5334 | 20,4441 | 15,6007 | 15,3507 | 4,4601 | -7,9113 | -10,9170 |
| 61,6313 | 61,3785 | 61,5998 | 20,4442 | 15,6010 | 15,3510 | 4,4478 | -7,9092 | -10,9075 |
| 61,3090 | 61,5558 | 61,6393 | 20,4443 | 15,6013 | 15,3513 | 4,4355 | -7,9071 | -10,8980 |
| 61,6268 | 61,5814 | 61,4729 | 20,4444 | 15,6016 | 15,3516 | 4,4232 | -7,9050 | -10,8885 |
| 61,5622 | 61,3584 | 61,2600 | 20,4445 | 15,6018 | 15,3518 | 4,4110 | -7,9029 | -10,8790 |
| 61,5213 | 61,4974 | 61,2487 | 20,4447 | 15,6021 | 15,3521 | 4,3987 | -7,9008 | -10,8695 |
| 61,6736 | 61,5180 | 61,4854 | 20,4448 | 15,6024 | 15,3524 | 4,3864 | -7,8987 | -10,8599 |
| 61,5593 | 61,6313 | 61,3588 | 20,4449 | 15,6027 | 15,3527 | 4,3742 | -7,8966 | -10,8504 |
| 61,5018 | 61,2845 | 61,3400 | 20,4450 | 15,6029 | 15,3529 | 4,3620 | -7,8945 | -10,8409 |
| 61,4903 | 61,3463 | 61,2615 | 20,4451 | 15,6032 | 15,3532 | 4,3498 | -7,8923 | -10,8314 |
| 61,5834 | 61,2297 | 61,4320 | 20,4452 | 15,6035 | 15,3535 | 4,3375 | -7,8902 | -10,8218 |
| 61,4135 | 61,5707 | 61,6053 | 20,4453 | 15,6038 | 15,3538 | 4,3254 | -7,8881 | -10,8123 |
| 61,7613 | 61,6372 | 61,3682 | 20,4455 | 15,6041 | 15,3541 | 4,3132 | -7,8859 | -10,8027 |
| 61,4808 | 61,7132 | 61,6243 | 20,4456 | 15,6043 | 15,3543 | 4,3010 | -7,8838 | -10,7932 |
| 61,3434 | 61,3499 | 61,4023 | 20,4457 | 15,6046 | 15,3546 | 4,2888 | -7,8816 | -10,7836 |
| 61,4237 | 61,2595 | 61,3352 | 20,4458 | 15,6049 | 15,3549 | 4,2767 | -7,8794 | -10,7741 |
| 61,3524 | 61,5317 | 61,8020 | 20,4459 | 15,6052 | 15,3552 | 4,2646 | -7,8772 | -10,7645 |
| 61,6501 | 61,3301 | 61,3997 | 20,4460 | 15,6055 | 15,3555 | 4,2524 | -7,8751 | -10,7549 |

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

| | | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|----------|
| 61,7767 | 61,3485 | 61,5268 | 20,4462 | 15,6057 | 15,3557 | 4,2403 | -7,8729 | -10,7454 |
| 61,3243 | 61,4496 | 61,4921 | 20,4463 | 15,6060 | 15,3560 | 4,2282 | -7,8707 | -10,7358 |
| 61,4669 | 61,5071 | 61,3435 | 20,4464 | 15,6063 | 15,3563 | 4,2161 | -7,8685 | -10,7262 |
| 61,4535 | 61,7473 | 61,5740 | 20,4465 | 15,6066 | 15,3566 | 4,2040 | -7,8663 | -10,7166 |
| 61,4437 | 61,4866 | 61,6369 | 20,4466 | 15,6069 | 15,3569 | 4,1920 | -7,8641 | -10,7070 |
| 61,3509 | 61,3532 | 61,6139 | 20,4467 | 15,6072 | 15,3572 | 4,1799 | -7,8619 | -10,6974 |
| 61,3058 | 61,7476 | 61,2932 | 20,4469 | 15,6074 | 15,3574 | 4,1679 | -7,8596 | -10,6878 |
| 61,5312 | 61,4575 | 61,6408 | 20,4470 | 15,6077 | 15,3577 | 4,1558 | -7,8574 | -10,6782 |
| 61,4059 | 61,4200 | 61,3920 | 20,4471 | 15,6080 | 15,3580 | 4,1438 | -7,8552 | -10,6686 |
| 61,3767 | 61,6120 | 61,5038 | 20,4472 | 15,6083 | 15,3583 | 4,1318 | -7,8529 | -10,6590 |
| 61,6280 | 61,6387 | 61,8180 | 20,4473 | 15,6086 | 15,3586 | 4,1198 | -7,8507 | -10,6494 |
| 61,4917 | 61,7723 | 61,3524 | 20,4475 | 15,6089 | 15,3589 | 4,1078 | -7,8484 | -10,6397 |
| 61,3918 | 61,4113 | 61,6314 | 20,4476 | 15,6091 | 15,3591 | 4,0958 | -7,8462 | -10,6301 |
| 61,5051 | 61,4028 | 61,5700 | 20,4477 | 15,6094 | 15,3594 | 4,0839 | -7,8439 | -10,6205 |
| 61,6676 | 61,2960 | 61,6512 | 20,4478 | 15,6097 | 15,3597 | 4,0719 | -7,8416 | -10,6108 |
| 61,2536 | 61,7892 | 61,5880 | 20,4479 | 15,6100 | 15,3600 | 4,0600 | -7,8394 | -10,6012 |
| 61,5851 | 61,6562 | 61,7577 | 20,4481 | 15,6103 | 15,3603 | 4,0480 | -7,8371 | -10,5915 |
| 61,5637 | 61,4583 | 61,6486 | 20,4482 | 15,6106 | 15,3606 | 4,0361 | -7,8348 | -10,5819 |
| 61,5200 | 61,6750 | 61,2977 | 20,4483 | 15,6108 | 15,3608 | 4,0242 | -7,8325 | -10,5722 |
| 61,6444 | 61,7272 | 61,4666 | 20,4484 | 15,6111 | 15,3611 | 4,0123 | -7,8302 | -10,5626 |
| 61,6636 | 61,5116 | 61,5851 | 20,4485 | 15,6114 | 15,3614 | 4,0004 | -7,8279 | -10,5529 |
| 61,4111 | 61,4470 | 61,4319 | 20,4487 | 15,6117 | 15,3617 | 3,9885 | -7,8256 | -10,5432 |
| 61,6240 | 61,6628 | 61,5691 | 20,4488 | 15,6120 | 15,3620 | 3,9767 | -7,8233 | -10,5336 |
| 61,5206 | 61,2096 | 61,5409 | 20,4489 | 15,6123 | 15,3623 | 3,9648 | -7,8209 | -10,5239 |
| 61,6040 | 61,5462 | 61,7264 | 20,4490 | 15,6126 | 15,3626 | 3,9530 | -7,8186 | -10,5142 |
| 61,7585 | 61,3931 | 61,7429 | 20,4492 | 15,6128 | 15,3628 | 3,9412 | -7,8163 | -10,5045 |
| 61,2460 | 61,6596 | 61,4546 | 20,4493 | 15,6131 | 15,3631 | 3,9293 | -7,8139 | -10,4948 |
| 61,5591 | 61,4694 | 61,5743 | 20,4494 | 15,6134 | 15,3634 | 3,9175 | -7,8116 | -10,4851 |
| 61,5908 | 61,7751 | 61,5231 | 20,4495 | 15,6137 | 15,3637 | 3,9057 | -7,8092 | -10,4754 |
| 61,4205 | 61,5703 | 61,4339 | 20,4496 | 15,6140 | 15,3640 | 3,8939 | -7,8068 | -10,4657 |
| 61,2616 | 61,5618 | 61,5534 | 20,4498 | 15,6143 | 15,3643 | 3,8822 | -7,8045 | -10,4560 |
| 61,3535 | 61,4821 | 61,4270 | 20,4499 | 15,6146 | 15,3646 | 3,8704 | -7,8021 | -10,4463 |
| 61,5805 | 61,3437 | 61,5660 | 20,4500 | 15,6148 | 15,3648 | 3,8587 | -7,7997 | -10,4366 |
| 61,5263 | 61,4472 | 61,3585 | 20,4501 | 15,6151 | 15,3651 | 3,8469 | -7,7973 | -10,4269 |
| 61,5061 | 61,6104 | 61,3533 | 20,4503 | 15,6154 | 15,3654 | 3,8352 | -7,7949 | -10,4171 |
| 61,5878 | 61,3911 | 61,2604 | 20,4504 | 15,6157 | 15,3657 | 3,8235 | -7,7925 | -10,4074 |
| 61,5474 | 61,3136 | 61,7024 | 20,4505 | 15,6160 | 15,3660 | 3,8118 | -7,7901 | -10,3977 |
| 61,2315 | 61,5841 | 61,3139 | 20,4506 | 15,6163 | 15,3663 | 3,8001 | -7,7877 | -10,3879 |
| 61,4601 | 61,4199 | 61,3562 | 20,4508 | 15,6166 | 15,3666 | 3,7884 | -7,7853 | -10,3782 |
| 61,2401 | 61,2338 | 61,5962 | 20,4509 | 15,6169 | 15,3669 | 3,7767 | -7,7829 | -10,3684 |
| 61,4063 | 61,5206 | 61,6127 | 20,4510 | 15,6171 | 15,3671 | 3,7651 | -7,7805 | -10,3587 |
| 61,6576 | 61,3888 | 61,6557 | 20,4511 | 15,6174 | 15,3674 | 3,7534 | -7,7780 | -10,3489 |
| 61,6710 | 61,3658 | 61,4839 | 20,4513 | 15,6177 | 15,3677 | 3,7418 | -7,7756 | -10,3391 |
| 61,4722 | 61,5504 | 61,4945 | 20,4514 | 15,6180 | 15,3680 | 3,7302 | -7,7731 | -10,3294 |

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

| | | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|----------|
| 61,4928 | 61,4186 | 61,6411 | 20,4515 | 15,6183 | 15,3683 | 3,7186 | -7,7707 | -10,3196 |
| 61,5271 | 61,3319 | 61,3210 | 20,4517 | 15,6186 | 15,3686 | 3,7070 | -7,7682 | -10,3098 |
| 61,3067 | 61,4250 | 61,5637 | 20,4518 | 15,6189 | 15,3689 | 3,6954 | -7,7657 | -10,3000 |
| 61,5252 | 61,5205 | 61,3445 | 20,4519 | 15,6192 | 15,3692 | 3,6838 | -7,7633 | -10,2903 |
| 61,5926 | 61,4883 | 61,5472 | 20,4520 | 15,6195 | 15,3695 | 3,6722 | -7,7608 | -10,2805 |
| 61,3112 | 61,4296 | 61,5679 | 20,4522 | 15,6197 | 15,3697 | 3,6607 | -7,7583 | -10,2707 |
| 61,3149 | 61,5823 | 61,4643 | 20,4523 | 15,6200 | 15,3700 | 3,6491 | -7,7558 | -10,2609 |

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.

Anexo 6 – Informe de ensayo térmico mediante Caja Natural de Plancha Caliente.

Instrumentación y caracterización del flujo térmico de materiales con aplicación al ahorro energético en edificación.