



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO DE FINAL DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

**EVALUACIÓN DE SOLUCIONES DE REHABILITACIÓN  
ENERGÉTICA PARA VIVIENDAS VULNERABLES EN EL BARRIO  
DEL RAVAL**



**Memoria y Anexos**

**Autor/a:** Dan Alexon Mendoza Hernandez  
**Director/a:** Alfredo Guardo Zabaleta  
**Entidad Colaboradora:** Asociación Oasiurbà  
**Convocatoria:** Mayo 2022



## Resumen

Este trabajo pretende investigar la posibilidad de realizar soluciones para la rehabilitación térmica de edificios en mal estado situados en el barrio del Raval mediante el uso de materiales reciclados como el aislamiento textil de poliamida procedente de mascarillas higiénicas y fibras de algodón recicladas. Estas soluciones deben ser soluciones sencillas, fáciles de instalar y, lo más importante, que sean lo más económicas posible ya que están pensadas para un barrio poblado por personas que están por debajo del umbral de pobreza. El presente trabajo ha sido elaborado en colaboración con una organización sin ánimo de lucro llamada Asociación Oasiurbà con sede en el barrio del Raval.

Los prototipos y su combinación con los materiales reciclados han sido analizados desde el punto de vista térmico. Para ello, se ha fabricado un dispositivo de medición y diferentes prototipos en el que se introducirán los materiales aislantes. El dispositivo se ha fabricado siguiendo el mismo principio de funcionamiento que una Caja Caliente Calibrada. Con este dispositivo se han determinado las propiedades térmicas de las soluciones utilizando un conjunto de sensores que ayudan a medir la diferencia de temperatura entre las dos caras del prototipo y un sensor de flujo de calor que registra el calor que pasa a través de los prototipos.

Los resultados obtenidos de las mascarillas higiénicas recicladas en los experimentos mostraron características térmicas prometedoras e incluso comparables con los materiales aislantes que se encuentran en el mercado como el aislante de algodón. Además, se ha obtenido una mayor resistencia térmica acoplando un material doméstico al final de su vida útil, como las cajas de huevos, junto con la máscara higiénica reciclada.

## Resum

Aquest treball pretén investigar la possibilitat de realitzar solucions per a la rehabilitació tèrmica d'edificis en mal estat situats al barri del Raval mitjançant l'ús de materials reciclats com l'aïllament tèxtil de poliamida procedent de mascaretes higièniques i fibres de cotó reciclades. Aquestes solucions han de ser solucions senzilles, fàcils d'instal·lar i, el més important, que siguin tan econòmiques com sigui possible ja que estan pensades per a un barri poblat per persones que estan per sota del llindar de pobresa. Aquest treball ha estat elaborat en col·laboració amb una organització sense ànim de lucre anomenada Associació Oasiurbà amb seu al barri del Raval.

Els prototips i la combinació amb els materials reciclats han estat analitzats des del punt de vista tèrmic. Per això, s'ha fabricat un dispositiu de mesurament i diferents prototips en què s'introduiran els materials aïllants. El dispositiu s'ha fabricat seguint el mateix principi de funcionament que una Caixa Calenta Calibrada. Amb aquest dispositiu s'han determinat les propietats tèrmiques de les solucions utilitzant un conjunt de sensors que ajuden a mesurar la diferència de temperatura entre les dues cares del prototip i un sensor de flux de calor que registra la calor que passa a través dels prototips.

Els resultats obtinguts de les mascaretes higièniques reciclades en els experiments van mostrar característiques tèrmiques prometedores i, fins i tot, comparables amb els materials aïllants que es troben al mercat com l'aïllant de cotó. A més, s'ha obtingut una resistència tèrmica més gran acoblant un material domèstic al final de la seva vida útil, com les caixes d'ous, juntament amb la màscara higiènica reciclada.

## **Abstract**

This work aims to investigate the possibility to realize solutions for the thermal rehabilitation of buildings in poor condition located in the Raval neighborhood using recycled materials such as polyamide textile insulation from hygienic masks and recycled cotton fibers. These solutions must be simple solutions, easy to install and, most importantly, as cheap as possible since they are intended for a neighborhood populated by people below the poverty threshold. This work has been prepared in collaboration with a non-profit organization called Asociación Oasiurbà based in the Raval neighborhood.

The prototypes and their combination with recycled materials have been analyzed from a thermal point of view. For this, a measuring device and different prototypes were manufactured in which the insulating materials will be introduced. The device has been manufactured following the same operating principle as a Calibrated Hot Box. With this device, the thermal properties of the solutions have been determined using a set of sensors that help measure the temperature difference between the two faces of the prototype and a heat flow sensor that records the heat that passes through the prototypes.

The results obtained from the recycled hygienic masks in the experiments showed promising thermal characteristics and even comparable with insulating materials found on the market such as cotton insulation. Furthermore, a higher thermal resistance was obtained by coupling an end of the life household material such as eggboxes together with the recycled hygienic mask.

## Agradecimiento

En primer lugar, me agradecer a toda mi familia, quienes me han apoyado dado su plena soporte en todo momento. Me gustaría dar las gracias a mis padres, que no sólo me han apoyado, sino que también me han dado fuerzas y razones para seguir mi camino sin importar la situación en el que nos encontráramos. Y un agradecimiento especial a mi novia por haberme escuchado y por darme maravillosos consejos siempre que lo necesite.

También me gustaría dar las gracias a la Asociación Oasiurbà por haberme proporcionado un espacio seguro para trabajar y por haberme dado pleno acceso a sus herramientas, así como por su total apoyo durante todo el proceso de fabricación y experimentación de los prototipos. También me gustaría agradecer al arquitecto Edgardo Müller del equipo de REEHABILITANT: Rehab energética de la Asociación Oasiurbà por darme la oportunidad de formar parte del proyecto y por guiarme en el proceso de fabricación para la puesta en marcha de la caja de ensayo y de los prototipos. Del mismo modo, agradezco también a las entidades externas que colaboran con la asociación para llevar a cabo el proyecto de REEHABILITANT con son el Col·legi d'Arquitectes de Catalunya (COAC), Centro de Diagnóstico Industrial y Fluidodinámica (CDIF-UPC), la Cátedra UPC-JG para la Sostenibilidad en Edificaciones y el Centre de Cooperació per al Desenvolupament de la UPC (UPC-CCD).

Y, por último, me gustaría agradecer especialmente a Alfredo Guardo Zabaleta, profesor del Departamento de Mecánica de Fluidos y Termodinámica de la EEBE-UPC, por guiarme, apoyarme y ayudarme en todo momento desde el inicio de mi TFG y, sobre todo, por permitirme formar parte de un proyecto tan maravilloso.

## Glosario

$Q$	Transferencia de calor
$\dot{Q}$	Velocidad de transferencia del calor
$Q$	Flujo promedio de calor
$k$	Conductividad térmica
$h$	Coefficiente de transferencia de calor por convección
$R$	Resistencia térmica
$U$	Coefficiente de transferencia de calor total
$L$	Espesor
$\rho$	Densidad
$M$	Massa
$V$	Volumen
$T$	Temperatura
$A$	Área
$\text{CO}_2$	Molécula de dióxido de carbono
$C1$ y $C2$	Índices de calificación energética
$\sigma_m$	Desviación típica de la media
$R_{err,n}$	Incertidumbre de una medida indirecta para la R
$U_{err,n}$	Incertidumbre de una medida indirecta para la U
$\varepsilon_{r,q}$ y $\varepsilon_{r,\Delta T}$	Incertidumbres de la medida de los sensores utilizados

## Índice

Resumen .....	i
Resum .....	ii
Abstract .....	iii
Agradecimiento .....	iv
Glosario .....	v
1. Introducción.....	1
1.1. Contextualización .....	1
1.2. Pobreza energética.....	2
1.2.1. Pobreza energética en el barrio del Raval.....	3
1.3. Origen del trabajo .....	5
1.4. Objetivos del trabajo.....	5
1.4.1. Objetivos generales.....	5
1.4.2. Objetivos específicos.....	5
1.5. Alcance del trabajo .....	6
2. Marco teórico.....	7
2.1. Transferencia de calor .....	7
2.2. Transferencia de calor en la edificación .....	8
2.2.1. Transferencia de calor a través de las paredes y los techos .....	9
2.3. Eficiencia energética.....	11
2.3.1. Etiqueta energética .....	13
2.4. Rehabilitación de los edificios.....	15
3. Normativa.....	16
3.1.1. Real Decreto 390/2021 .....	16
3.1.2. Código técnico de la edificación (CTE) .....	16
3.1.3. Real Decreto 737/2020 .....	16
3.1.4. Real Decreto 1027/2007 .....	17
4. Estudio experimental .....	18
4.1. Métodos de evaluación .....	18
4.1.1. Cálculo teórico.....	18

4.1.2.	Heat flow meter .....	19
4.1.3.	Caja Caliente.....	20
4.2.	Cámara de ensayo.....	21
4.2.1.	Preparación de la cámara de ensayo .....	22
4.2.2.	Instalación de la fuente de calor .....	27
4.3.	Elementos de medición.....	28
4.3.1.	Sensor de temperatura .....	28
4.3.2.	Sensor de flujo de calor .....	30
4.4.	Preparación de los aislantes .....	32
4.4.1.	Aislamiento de poliamida textil proveniente de mascarillas higiénicas .....	33
4.4.2.	Cartones de huevos reciclados.....	35
4.5.	Prototipo diseñado para paredes y techos.....	36
5.	Metodología del ensayo.....	38
5.1.	Ensayo térmico .....	38
5.1.1.	Configuraciones estudiadas .....	39
5.2.	Hipótesis del análisis térmico .....	40
5.3.	Cálculo de la resistencia y transmitancia térmica.....	41
5.4.	Análisis de errores .....	42
6.	Resultados y análisis.....	44
7.	Análisis del impacto ambiental.....	50
8.	Conclusiones.....	52
9.	Análisis económico .....	53
10.	Bibliografía.....	54
11.	Anexos.....	58
Anexo A.	Certificado de calibración del sensor de flujo de calor.....	58
Anexo B.	Planos de la caja de ensayo y de los paneles ensayados.....	59

## Índice de figuras

Figura 1.1 - Intensidad de pobreza energética por distritos de Barcelona el año 2016 [22].....	4
Figura 2.1 - Transmisión de calor en edificios [36].....	8
Figura 2.2 - Resistencias térmicas superficiales de cerramientos en contacto con el aire exterior en $m^2 \cdot K/W$ [11].....	10
Figura 2.3 - Evolución del consumo energético en el sector residencial diferenciada por usos y fuentes de energía entre el año 2010 y 2019 [37] .....	11
Figura 2.4 - Clasificación energética de los edificios de uso residencial [18].....	12
Figura 2.5 - Etiqueta de eficiencia energética [18].....	14
Figura 4.1 – Esquema del funcionamiento del medidor de flujo térmico para la medición de la conductividad térmica de una muestra .....	19
Figura 4.2 - Principales diferencias entre GHB y CHB.....	21
Figura 4.3 - Características del modelo HFP01 (Elaboración propia).....	30
Figura 4.4 - Características del registrador LI-19 (Elaboración propia).....	31
Figura 6.1 - Flujo de calor registrado en la superficie de la cámara ambiente y las temperaturas de la cámara caliente y cámara ambiente de cada caso (Elaboración propia).....	45
Figura 6.2 - Incremento de temperatura en los dos lados de la cámara de ensayo (Elaboración propia) .....	46
Figura 6.3 – Representación gráfica de los resultados de la resistencia térmica (Elaboración propia) .....	48
Figura 6.4 - Representación gráfica de los resultados de la transmitancia térmica (Elaboración propia) .....	49
Figura 7.1 - Interfaz de la calculadora de las emisiones de $CO_2$ [35].....	51
Figura 11.1 - Certificado de calibración (Elaboración propia).....	58

## Índice de ilustraciones

Ilustración 4.1 – Caja caliente protegida (izquierda) y Caja caliente calibrada (derecha) [30].....	20
Ilustración 4.2 - Cámara de ensayo (Elaboración propia) .....	22
Ilustración 4.3 - Estado inicial de la cámara de ensayo (Elaboración propia).....	22
Ilustración 4.4 - Cinta adhesiva de presión.....	23
Ilustración 4.5 - Rollo de corcho .....	24
Ilustración 4.6 - Planchas de EPS.....	25
Ilustración 4.7 – Cámara caliente (derecha) y Cámara ambiente (izquierda) (Elaboración propia).	26
Ilustración 4.8 - Cubiertas de la cámara de ensayo (elaboración propia) .....	26
Ilustración 4.9 - Dimensiones de la pre-tapa (Elaboración propia) .....	27
Ilustración 4.10 - Conexión de la fuente de calor del sistema (Elaboración propia).....	27
Ilustración 4.11 - Posicionamiento de la fuente dentro de la cámara de ensayo .....	28
Ilustración 4.12 - Sensor de temperatura superficial (Elaboración propia) .....	29
Ilustración 4.13 - Configuración inicial del sensor de flujo de calor (Elaboración propia).....	32
Ilustración 4.14 - Pesa digital (Elaboración propia) .....	33
Ilustración 4.15 - Elementos de empaquetamiento y marcaje (Elaboración propia) .....	33
Ilustración 4.16 - Proceso de la preparación del material (Elaboración propia).....	35
Ilustración 4.17 - Preparación de los cartones de huevos (Elaboración propia).....	36
Ilustración 4.18 - Panel autoportante de DM10 (Elaboración propia).....	37
Ilustración 5.1 – Esquema de la prueba (Elaboración propia).....	38
Ilustración 5.2 - Preparaciones previas para cada ensayo realizado (Elaboración propia).....	39

## Índice de tablas

Tabla 4.1 - Conductividad térmica de EPS.....	24
Tabla 4.2 - Peso necesario para cada densidad establecida (Elaboración propia).....	34
Tabla 5.1 Configuraciones estudiadas (Elaboración propia).....	39
Tabla 5.2 - Condiciones exteriores ambientales y duración de cada ensayo realizado [33].....	40
Tabla 6.1 - Valores medios de la variación de la temperatura y del flujo de calor de los casos ensayados (Elaboración propia).....	46
Tabla 6.2 - Valores calculados de la resistencia térmica a partir de las pruebas realizados (Elaboración propia) .....	48
Tabla 6.3 - Valores calculados de la transmitancia térmica a partir de las pruebas realizadas (Elaboración propia).....	49
Tabla 7.1 - Resumen del consumo energético de cada actividad (Elaboración propia) .....	50
Tabla 7.2 - Emisiones de CO2 generados en el trabajo (Elaboración propia).....	51
Tabla 9.1 - Análisis de costes del proyecto (Elaboración propia) .....	53

# 1. Introducción

## 1.1. Contextualización

El barrio del Raval, situado en el distrito de CiutatVella, es una de las zonas urbanas más densamente pobladas del mundo. Los planes de regeneración recientes y en curso han modificado drásticamente las características sociales, medioambientales y económicas de algunas partes de la zona. Sin embargo, los efectos más amplios de los planes aún no han llegado a muchas de las calles, que siguen sin haber sido tocadas desde la Edad Media.

El barrio no tomó forma hasta el siglo XVIII. En los terrenos que habían sido ocupados por huertos se construyeron las primeras manufactureras, lo que lo convirtió en uno de los primeros barrios fabriles de Barcelona. En las primeras décadas del siglo XX, cuando la actividad industrial ya no era primordial en el barrio, el Raval recibió grandes oleadas de inmigrantes en busca de trabajo, ya que la industria y las obras públicas de la ciudad requerían mano de obra [26].

Actualmente, el Raval sigue siendo un barrio con predominio de la función residencial, fundamentalmente para las clases populares. Según el análisis realizado por B-Raval el 2020 [14], de los 17.200 domicilios del barrio, 1.750 tienen menos de 30 m<sup>2</sup> y la ocupación media es de 2,79 habitantes por domicilio, pero hay 1.680 domicilios en los que viven más de 6 personas. El 80,6% de estos hogares fueron construidos antes del 1960 según los datos recopilados por la Oficina Municipal de Dades Gerència Municipal en el año 2020 [25].

Además, de los 463,857 habitantes en Barcelona nacidos en extranjero, 108.331 residen en CiutatVella y unos 29.411 se centran en el barrio del Raval a data del 2020. El 60,9% de la población del barrio son extranjeros, de los cuales el 79,4% (23.358 habitantes) tienen la nacionalidad extranjera y con procedencia mayoritariamente de Filipinas (18,3%), Pakistán (15,5%) y Bangladesh (9,3%) [7].

Alrededor del 13,9% de la población (de entre 16 a 64 años) del barrio del Raval se encuentra en situación de desempleo, un porcentaje que es superior al de CiutatVella que registró un 11,7% el año 2020. Del mismo modo, el 50,4% de la población que se encuentran en situación de desempleo en el barrio son de origen extranjero a diferencia del porcentaje registrado en CiutatVella que ronda los 46,8%.

Ante estas problemáticas se encuentra la población del centro histórico de Barcelona, correspondiente al distrito de CiutatVella que, como consecuencia, crea una gran desigualdad energética en el barrio que afecta a las condiciones de vida de los vecinos del Raval.

## 1.2. Pobreza energética

*“La pobreza energética es la incapacidad de un hogar de obtener unos servicios energéticos adecuados (en la vivienda) por el 10% de su renta”*

Primera definición de la pobreza energética establecida por Brenda Boardman en 1991.

La pobreza energética se puede definir como la incapacidad de una vivienda para mantener las condiciones de confort adecuadas para alcanzar un nivel social y materialmente necesario de servicios domésticos de la energía [5] que dificulta que haya una participación efectiva en la sociedad. Hay una gran variedad de índices que puede provocar la pobreza energética en un hogar como es la combinación de los siguientes factores:

- Bajos ingresos de los hogares
- Baja eficiencia energética en las viviendas
- Elevados precios de la energía

Cabe destacar que la pobreza energética puede manifestarse de diferentes formas para cada ciudadano. Un ejemplo de estos es la incapacidad de algunas personas que viven en edificios ineficientes de mantener una temperatura adecuada en sus hogares, lo que hace que sean más expuestos a las olas de frío, olas de calor y otros impactos del cambio climático.

A pesar de los progresos acelerados que se están llevando a cabo para combatir esta problemática a nivel mundial, actualmente sigue habiendo más de 759 millones de personas sin acceso a la electricidad y cerca de la mitad de ellas vive en zonas frágiles y afectadas por conflictos [23].

Según [15] la pobreza energética es un problema generalizado en toda Europa, ya que entre 50 y 125 millones de personas no pueden permitirse un confort térmico interior adecuado. Además, en un estudio realizado por Médicos del Mundo [20], se observa que la pobreza energética afecta a 6,8 millones de ciudadanos en España y a un tercio de la población mundial.

En España, se realiza un seguimiento de la pobreza energética a partir de una serie de indicadores propuestas por el Observatorio Europeo de Pobreza Energética (EPOV).

Dichos indicadores son los siguientes:

- Gasto desproporcionado (2M): porcentaje de hogares cuyo gasto energético en relación con sus ingresos es más del doble de la mediana nacional
- Pobreza energética escondida (HEP): porcentaje de los hogares cuyo gasto energético absoluto es inferior a la mitad de la mediana nacional
- Incapacidad para mantener la vivienda a una temperatura adecuada: porcentaje de la población que no puede mantener su vivienda a una temperatura adecuada.

- Retraso en el pago de las facturas: porcentaje de población que tiene retrasos en el pago de facturas de los suministros de la vivienda

En los estudios realizados por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) y publicado en el informe de Actualización de Indicadores 2020 de pobreza energética, se puede ver un incremento significativo en los indicadores del porcentaje de la temperatura inadecuada en la vivienda en invierno, que pasó de ser un 7,6% en 2019 al 10,9% en 2020, y el retraso en el pago de facturas que aumentó del 6,6% al 9,6% [1].

Estos aumentos reflejan la dificultad que han tenido los hogares más vulnerables durante el periodo de la pandemia COVID-19, con las restricciones y la suspensión de las actividades laborales, para hacer frente al pago de facturas el año 2020. Ante estas situaciones extraordinarias se han establecido medidas urgentes como el Real Decreto-ley 8/2020, de 17 de marzo, de medidas urgentes extraordinarias para hacer frente al impacto económico y social del COVID-19 y el Real Decreto-ley 11/2020, de 31 de marzo, por el que se adoptan medidas urgentes complementarias en el ámbito social y económico para hacer frente a los efectos de la pandemia [3] [4]. Dichas medidas permitieron que los indicadores del 2020 sean relativamente inferiores comparado con los datos recopilados en los años 2017 y 2018.

### 1.2.1. Pobreza energética en el barrio del Raval

De acuerdo con los resultados de la Encuesta de Condiciones de Vida el año 2016 (ECV), la cantidad de personas con dificultad de pagar la factura de la luz, el gas o el agua o de mantener una temperatura adecuada en Barcelona son de unos 170,000 habitantes. Además, los resultados de la Encuesta de Salud Pública de Barcelona (ESPB 2016), muestran que la intensidad de la pobreza energética en CiutatVella es cinco veces más alto que el distrito de Les Corts que tiene el índice más bajo comparado con el resto de los distritos de Barcelona [22]. Esto es debido, principalmente, a la baja calidad del parque inmobiliario, un alto volumen de extranjeros y de elevados índices de desempleo que hay en la zona, sobre todo, en el barrio del Raval.

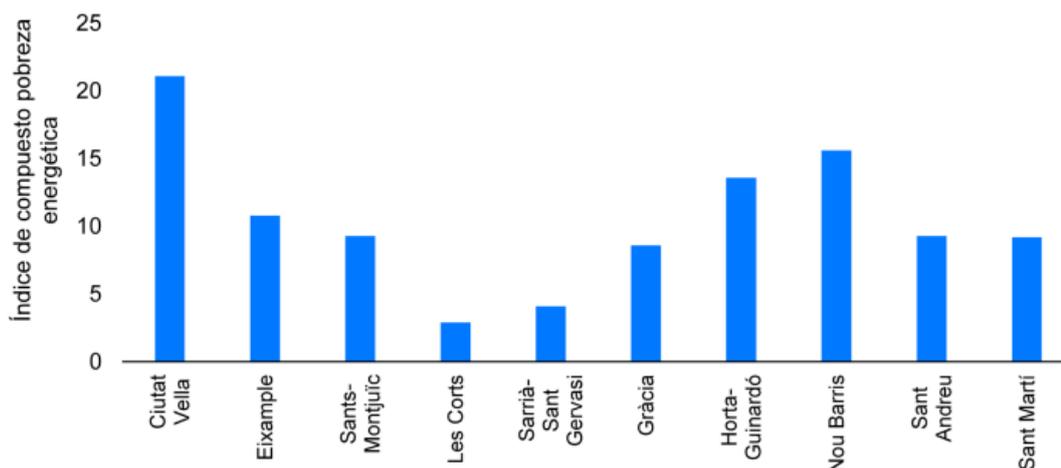


Figura 1.1 - Intensidad de pobreza energética por distritos de Barcelona el año 2016 [22]

La Figura 1.1 muestra la intensidad de pobreza energética por distritos en Barcelona el año 2016. Este índice está basado en tres indicadores principales que son: la incapacidad de mantener la vivienda a una temperatura adecuada, el retraso en el pago de las facturas y la presencia de goteras, humedades o podredumbre en la vivienda y se ha calculado empleando la propuesta de Thomson Snell (2013).

Otro de los factores más importantes de la pobreza energética en el barrio es el continuo aumento de la cantidad de personas que se encuentran en situaciones de desempleo en los últimos años como resultado de la pandemia COVID-19. Durante comienzo del año 2021, el número total de la población de entre 16 y 64 años que se encontraron en una situación de desempleo llegó a alcanzar los 5,179 habitantes. Esta cantidad, pero, se ha visto reducido en los últimos meses del año debido al aumento de empleos disponibles causados por el continuo aflojamiento de las restricciones y la reapertura de la mayoría de los locales. A mes de diciembre del 2021, el número de los desempleados en el barrio del Raval bajó a los 3,034 habitantes.

Aun así, sigue habiendo un alto porcentaje de familias en el barrio que se encuentran en situaciones vulnerables desde el punto de vista energético tal como se puede observar en la Figura 1.1. Por esta razón es de gran importancia los proyectos que se está llevando a cabo la Asociación Oasiurbà. Uno de sus proyectos está enfocado precisamente en estudiar qué mejoras se pueden hacer para que las viviendas más antiguas, como las del barrio del Raval, sean más eficientes desde el punto de vista energético.

### 1.3. Origen del trabajo

El presente trabajo se ha elaborado en colaboración con la Asociación Oasiurbà, que es una entidad social sin ánimo de lucro que centra su actividad en la defensa del derecho a la Vivienda digna de todas las ciudadanas de Barcelona.

La organización está formada por un grupo de jóvenes profesionales de diversas disciplinas técnicas que ponen sus conocimientos y experiencia al servicio de la ciudadanía. Arquitectos, abogados, ingenieros e interventores sociales trabajan de forma coordinada y articulada para dar soluciones profesionales a los distintos problemas que amenazan el Derecho a la Vivienda de los barceloneses [32].

El proyecto “REEHABILITANT: Rehabilitación energética exprés para hogares vulnerables” es uno de los proyectos que la asociación está llevando a cabo en colaboración con el Centro de Diagnóstico Industrial y Dinámica de Fluidos (CDIF) y la Cátedra de Sostenibilidad en los Edificios de la UPC. El proyecto tiene como objetivo la investigación, la implementación y la evaluación de diferentes actuaciones de bajo coste para mejorar el confort térmico de los vecinos del Raval que viven en condiciones perjudiciales debido a la degradación material del edificio en el que viven.

### 1.4. Objetivos del trabajo

#### 1.4.1. Objetivos generales

El objetivo principal del presente trabajo es analizar la transmitancia térmica de las actuaciones de rehabilitación energética estudiadas y clasificadas en las investigaciones anteriores mediante simulaciones computacionales mediante el uso de una cámara de ensayo.

Además, a parte a las soluciones estudiadas en los años anteriores, también se investigará el comportamiento de algunos materiales domésticos que se encuentran al final de su vida útil, específicamente, se estudiará los posibles efectos térmicos de los cartones de huevos.

#### 1.4.2. Objetivos específicos

A continuación, se encuentra una lista que describe los objetivos específicos del proyecto:

- Terminar la construcción de la cámara climática mejorando su hermeticidad e instalando la fuente de calor del sistema. La construcción de este dispositivo es de vital importancia para el proyecto ya que será utilizada para evaluar la transmitancia térmica de los prototipos

- Fabricar los prototipos de las soluciones constructivas previamente seleccionadas con el fin evaluar experimentalmente el comportamiento térmico de cada actuación propuesta
- Evaluar el comportamiento térmico de los materiales reciclados juntamente con las soluciones estudiadas en los trabajos anteriores
- Determinar la resistencia y transmitancia térmica de cada actuación propuesta
- Determinar las mejores soluciones de rendimiento térmico que pueden utilizarse para mejorar el confort térmico de los habitantes del Raval cuyas viviendas se encuentran en mal estado

### 1.5. Alcance del trabajo

El alcance de este proyecto será el desarrollo y la experimentación de los diferentes tipos de actuaciones, elaboradas en los estudios anteriores, mediante la fabricación de prototipos con las características de las soluciones de rehabilitación planteadas por el equipo de arquitectos de la Asociación Oasiurbà. Este estudio estará enfocado en las áreas donde los edificios antiguos son más susceptibles a las pérdidas de calor. En particular, se centrará en las paredes interiores de las viviendas. Para ello, hemos fabricado cuatro paneles autoportantes diseñados para las actuaciones de la pared y la cubierta en el que se ensayarán tres tipos de materiales aislantes.

El presente trabajo se limita a la experimentación de los prototipos disponibles de las soluciones propuestas y variando algunos de los parámetros como la densidad y el espesor de los aislantes térmicos utilizados en cada ensayo. También estará fuera del alcance la implementación y la puesta en marcha de los prototipos in-situ debido al tiempo dedicado a la fabricación de los prototipos y de la cámara climática. Además, de las soluciones constructivas fabricadas, solo se ha podido experimentar en uno de ellos.

Finalmente, debido a la época del año de la realización de este trabajo, los experimentos serán evaluados bajo las condiciones ambientales de primavera.

## 2. Marco teórico

### 2.1. Transferencia de calor

La energía puede existir en numerosas formas, como térmica, mecánica, cinética, potencial, eléctrica, magnética, química y nuclear, y su suma constituye la energía total  $E$  de un sistema. Las formas de energía relacionadas con la estructura molecular de un sistema y con el grado de la actividad molecular se conocen como energía microscópica. La suma de todas las formas microscópicas de energía se llama energía interna de un sistema y se denota por  $U$  [24].

Este estudio se centra sobre todo en el calor, que es la forma de la energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia en la temperatura. El calor se puede transferir en tres modos diferentes: conducción, convección y radiación.

Un análisis termodinámico se interesa en la cantidad de transferencia de calor conforme un sistema pasa por un proceso, de un estado de equilibrio a otro. En cambio, la transferencia de calor es la ciencia que trata de predecir la razón o la rapidez de esas transferencias de energía [24].

Se denomina  $Q$  [J] a la cantidad de calor transferido durante el proceso y la cantidad de calor transferido por unidad de tiempo se llama velocidad de transferencia de calor y se denota por  $\dot{Q}$  [J/s o W].

$$Q = \int_0^{\Delta t} \dot{Q} \cdot dt \quad (\text{Ec. 2.1})$$

$$Q = \dot{Q} \cdot \Delta t \quad (\text{Ec. 2.2})$$

La razón de transferencia de calor por unidad de área perpendicular a la dirección de esa transferencia se llama flujo de calor.

$$q = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

## 2.2. Transferencia de calor en la edificación

Muchos aspectos del diseño, la construcción y el funcionamiento de los edificios pueden afectar a la salud y la comodidad de las personas que los habitan. Según el Sustainable Building and Climate Initiative of the UN [29], los edificios son responsables del 40% del consumo mundial de energía. Aparte de la energía necesaria para los electrodomésticos o el agua caliente sanitaria, una gran parte de toda la energía consumida se utiliza para el acondicionamiento del espacio (calefacción y refrigeración), para satisfacer las necesidades de confort de los ocupantes.

Independientemente de la ubicación geográfica, tamaño y el tipo de construcción de una casa, el calor siempre se desplaza desde el medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de más baja temperatura [24]. En invierno, calentamos el interior de una vivienda, por lo que la dirección del flujo de calor es de dentro a fuera. Pero durante los meses de verano, sin embargo, la dirección del flujo se invierte debido a las elevadas temperaturas en el exterior.

Las pérdidas de energía en los edificios a través de las paredes, los tejados, los suelos y las zonas acristaladas son responsables de más del 60% del consumo energético de los edificios convencionales. Gran parte de estas pérdidas se producen a través de paredes no aisladas que, con una buena barrera térmica que incluya aislamiento en las ventanas y las paredes no solo reduce el derroche de la energía, sino que también aumenta en gran medida el confort térmico de los ocupantes.

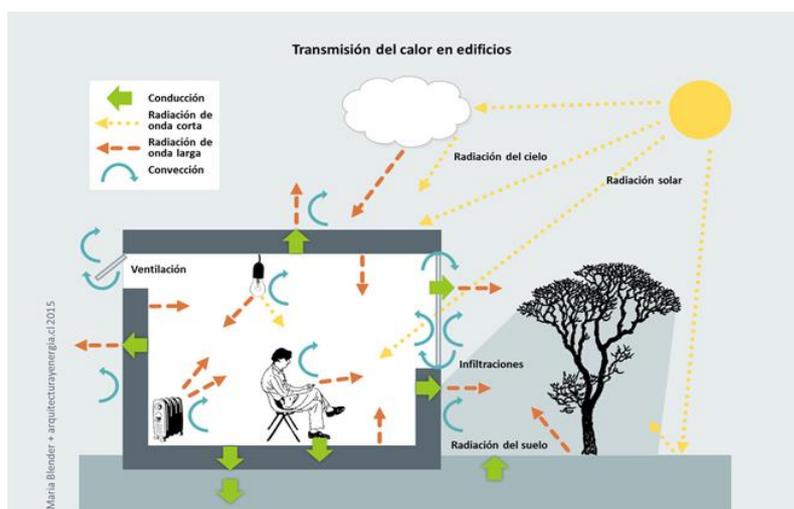


Figura 2.1 - Transmisión de calor en edificios [36]

### 2.2.1. Transferencia de calor a través de las paredes y los techos

Como se ha mencionado anteriormente, la transferencia de calor entre dos sistemas puede suceder principalmente de tres maneras: por conducción, por convección y por radiación.

La transferencia de calor en los techos y las paredes se analizan de la misma manera. En invierno, la pérdida de calor es una transmisión simple basada en la temperatura interior y exterior, y el valor de U de la estructura compuesta. Esta transferencia de calor se puede determinar a partir de la siguiente expresión:

$$\dot{Q} = U \cdot A_s \cdot (T_i - T_e) = \frac{A_s \cdot (T_i - T_e)}{R} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Dónde:  $A_s$  = Área de transferencia de calor [ $\text{m}^2$ ];  $U$  = Transmitancia térmica [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ];  $T_i$  = Temperatura del aire en el interior [ $\text{K}$ ];  $T_e$  = Temperatura del aire en el exterior [ $\text{K}$ ];  $R$  = Resistencia térmica unitaria total [ $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ].

Debido al hecho de que las paredes y los techos están compuestos por diferentes capas de materiales que pueden comportar de forma distinta en diferentes edificios, no es práctico enlistar los valores de  $R$  (o los factores  $U$ ) de clases diferentes de paredes o techos en condiciones diferentes.

$$R = \frac{L}{k} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Durante los meses de verano, sin embargo, la radiación solar incide en la superficie exterior de la pared y el techo y la radiación absorbida aumenta la temperatura de la superficie exterior a un valor mayor que la temperatura del aire exterior. Por lo tanto, la transferencia de calor a través de las paredes y de los techos también se ven afectadas por los coeficientes de transferencia de calor por convección y radiación en las superficies expuestas. Los efectos de estos sobre las superficies interior y exterior de las paredes y techos suelen combinarse en los coeficientes combinados de transferencia de calor por convección y radiación,  $h_i$  y  $h_o$ .

Las resistencias térmicas superficiales correspondientes (valores  $R$ ) se determinan a partir de las siguientes expresiones:

$$R_i = \frac{1}{h_i} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

$$R_o = \frac{1}{h_o} \tag{Ec. 2.7}$$

Dónde:  $h_i$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección [ $W/m^2$ ];  $h_o$  = Coeficiente de transferencia de calor por radiación [ $W/m^2$ ].

El valor R de la estructura de una pared o techo que comprenda capas de espesor uniforme se puede determinar sumando las resistencias térmicas unitarias de las capas que están en serie:

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \tag{Ec.2.8}$$

Dónde:  $R_1 + R_2 + \dots + R_n$  = Resistencias térmicas de cada capa definidas según la Ecuación 3.5 [ $m^2 \cdot K/ W$ ];  $R_{si}$  y  $R_{se}$  = Las resistencias térmicas superficiales correspondientes al aire interior y exterior respectivamente, tomadas de la Figura 2.2 de acuerdo con la posición del cerramiento, dirección del flujo de calor y su situación en el edificio [ $m^2 \cdot K/ W$ ].

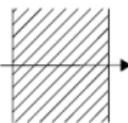
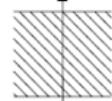
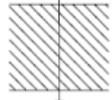
Posición del cerramiento y sentido del flujo de calor		$R_{se}$	$R_{si}$
Cerramientos verticales o con pendiente sobre la horizontal $>60^\circ$ y flujo Horizontal		0,04	0,13
Cerramientos horizontales o con pendiente sobre la horizontal $\leq 60^\circ$ y flujo ascendente (Techo)		0,04	0,10
Cerramientos horizontales y flujo descendente (Suelo)		0,04	0,17

Figura 2.2 - Resistencias térmicas superficiales de cerramientos en contacto con el aire exterior en  $m^2 \cdot K/W$  [11]

### 2.3. Eficiencia energética

En pocas palabras, la eficiencia energética significa utilizar menos energía para realizar el mismo trabajo y, por tanto, reducir la pérdida de energía. La eficiencia energética es también la forma más rentable de combatir el cambio climático, reducir la contaminación del aire y de los costes a nivel doméstico y económico.

La eficiencia energética en edificios consiste en minimizar la energía necesaria para ahorrar y hacer el uso más racional de la energía disponible. En su conjunto, los edificios son responsables del 40% del consumo energético de la UE y el 75% del parque inmobiliario de la UE es ineficiente desde el punto de vista energético [15] [21], lo que significa que gran cantidad de energía consumida se desperdicia.

La eficiencia energética de los edificios se determina calculando o midiendo el consumo de energía necesaria para satisfacer anualmente la demanda energética del edificio en unas condiciones normales de funcionamiento y ocupación en cuanto a calefacción, refrigeración, ventilación, producción de agua caliente sanitaria y, en su caso, la iluminación.

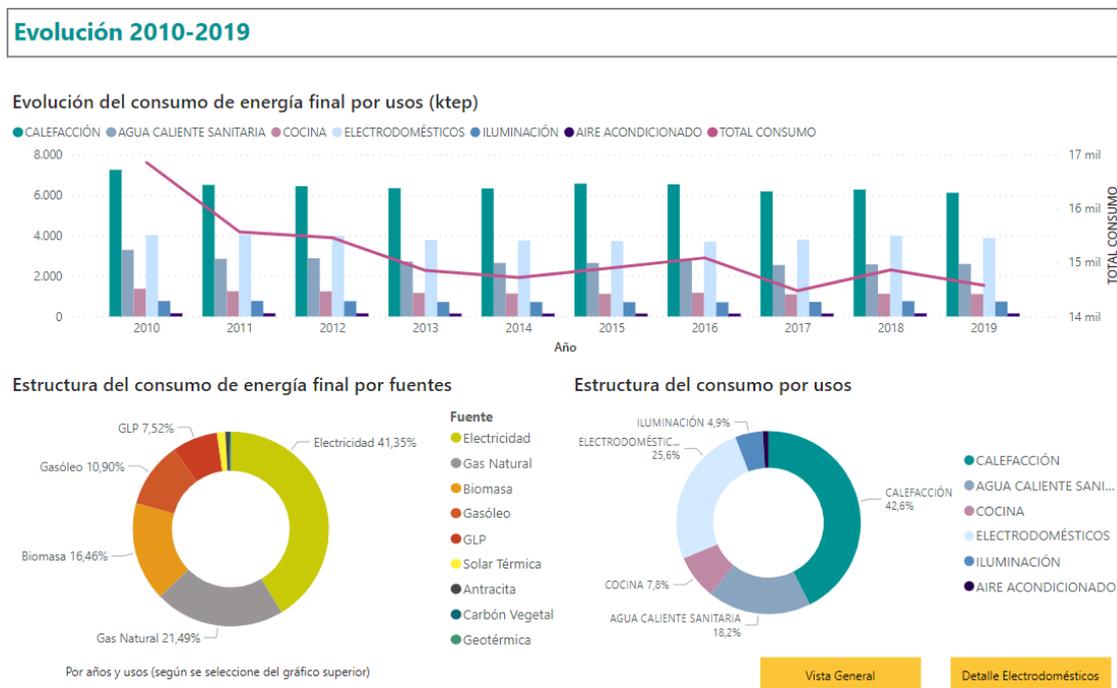


Figura 2.3 - Evolución del consumo energético en el sector residencial diferenciada por usos y fuentes de energía entre el año 2010 y 2019 [37]

La clasificación energética de los edificios se expresa a través de varios indicadores que siguen el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios según el Real Decreto 390/2021 de 1 de junio, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios [6].

Estos indicadores se pueden dividir en dos grupos que son los siguientes.

- Indicadores principales o globales de eficiencia energética:
  - Emisiones anuales de  $CO_{2e}$
  - Consumo anual de energía primaria no renovable
  
- Indicadores complementarios de eficiencia energética:
  - Demanda energética anual de calefacción
  - Demanda energética anual de refrigeración
  - Consumo anual de energía primaria no renovable desagregada por servicios
  - Emisiones anuales de  $CO_{2e}$  desagregada por servicios
  - Emisiones anuales de  $CO_{2e}$  desagregada por consumo eléctrico y por otros combustibles

Los edificios destinados a uso residencial privado (vivienda) se clasifican, para cada uno de los indicadores de eficiencia energética, dentro de una escala de siete letras, que va desde la letra A, para señalar el máximo grado de eficiencia energética, a la letra G, para señalar los edificios o viviendas menos eficientes.

Calificación		Índice	
A		C1	< 0,15
B	0,15	∩	< 0,50
C	0,50	∩	< 1,00
D	1,00	∩	< 1,75
E	1,75	∩	C1 < 1,00
F	1,75	∩	C1 < 1,50
	1,00	∩	C2 < 1,50
G	1,75	∩	C1
	1,50	∩	C2

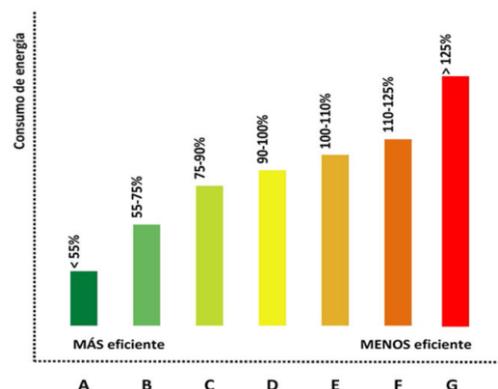


Figura 2.4 - Clasificación energética de los edificios de uso residencial [18]

Para determinar de la letra de calificación, primero se debe calcular el índice de calificación de eficiencia energética mediante la siguiente expresión:

$$C_1 = \frac{\left(R \cdot \frac{I_0}{I_r}\right) - 1}{2(R - 1)} + 0,6 \quad (\text{Ec. 2.9})$$

$$C_2 = \frac{\left(R' \cdot \frac{I_0}{I_s}\right) - 1}{2(R' - 1)} + 0,5 \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Dónde:  $I_0$  = Valor del indicador analizado del edificio objeto;  $I_r$  = Valor medio del indicador del parque de referencia de edificios nuevos de uso residencial privado;  $R$  = Ratio entre el valor de  $I_0$  y el valor del indicador correspondiente al percentil del 10 % del parque de referencia de edificios nuevos de uso residencial privado;  $I_s$  = Valor medio del indicador del parque de referencia de edificios existentes de uso residencial privado;  $R_0$  = Ratio entre el valor de  $I_s$  y el valor del indicador correspondiente al percentil del 10 % del parque de referencia de edificios existentes de uso residencial privado.

### 2.3.1. Etiqueta energética

La etiqueta de eficiencia energética indica la calificación energética de un electrodoméstico o edificio según una escala que evalúa su consumo. La etiqueta de eficiencia energética de edificios en territorio español se ajustará al modelo que se puede observar a la Figura 2.5. En función de su uso, existe la posibilidad de modificar sus dimensiones, siempre que sea legible y se conserve su formato y proporciones originales [18].



Figura 2.5 - Etiqueta de eficiencia energética [18]

Como se puede observar, el certificado contiene una amplia información como son:

- Procedimiento utilizado para calificar la eficiencia energética de la vivienda
- Identificación de la vivienda
- Características energéticas del inmueble
- Normativa de ahorro y eficiencia aplicada en el momento de la construcción de la vivienda
- Todas las comprobaciones, pruebas e inspecciones realizadas en el proceso de certificación
- Calificación de la eficiencia energética de la vivienda expresada con la etiqueta energética

## 2.4. Rehabilitación de los edificios

En España, gran porcentaje del parque inmobiliario han sido construidos sin ningún criterio de eficiencia energética, ya que, el 43,9% de estos han sido construidos antes de la aplicación del Código Técnico de la Edificación (CTE) y el 50,8% fueron construidos antes de la aplicación de la NBE-CT 79, que es la primera normativa que tiene en cuenta criterios de eficiencia energética en España. Además, el sector de la edificación en el país ocasiona el 30,1% del consumo de energía final y el 25,1% de las emisiones de CO<sub>2</sub>, de las cuales el 8,2% son emisiones directas asociadas al consumo de combustible en el sector residencial, comercial e institucional [17].

En Cataluña aproximadamente existen 3.775.879 viviendas a data del 2021. Un gran porcentaje de estas carecen de un aislamiento térmico adecuado y se encuentran en condiciones precarias ya que alrededor del 59,8% de estas tienen una antigüedad de más de 40 años. Además, el 84,5% del parque inmobiliario en su capital, Barcelona, tienen más de 40 años de antigüedad [13].

Según los datos oficiales del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), se estima que cada familia emite unas 5000Kg de CO<sub>2</sub> a la atmosfera ya que la mayoría de la energía que consume el sector de edificación es energía generada mediante combustibles fósiles. Esto causa graves efectos ambientales, razón del cual es de vital importancia la rehabilitación del parque inmobiliario con el objetivo de reducir su demanda y, por tanto, el consumo energético.

La rehabilitación de viviendas es aquella acción constructiva que se realiza para mejorar las condiciones de habitabilidad, de seguridad estructural y constructiva, de protección contra la presencia de agua y humedad, de sus instalaciones, de la accesibilidad, de su eficiencia energética, de sus condiciones de iluminación natural y ventilación interior, de las dimensiones de los espacios interiores. En general, la rehabilitación de las viviendas tiene como objetivo principal mejorar la calidad de vida y el confort de los usuarios de un edificio. Estas acciones se pueden realizar tanto en el interior de las viviendas como en las zonas comunes de los edificios residenciales [27].

El presente documento en particular se centra en estudiar diferentes tipos de intervenciones de rehabilitación en las viviendas destinadas a mejorar la eficiencia energética de estas. Existen tres áreas fundamentales en las que se pueden tomar acciones para mejorar la eficiencia energética de un edificio y son las siguientes:

- La envolvente del edificio
- Las instalaciones energéticas y térmicas
- El sistema de gestión y control

Dichas intervenciones están enfocadas en mejorar el aislamiento térmico de las viviendas con el fin de evitar posibles pérdidas de frío o calor de estas y aislarla del exterior.

## 3. Normativa

### 3.1.1. Real Decreto 390/2021

El Real Decreto 390/2021, de 1 de junio, es un texto consolidado que incorpora algunas modificaciones para la mejora del procedimiento de certificación energética de edificios:

- a. Actualización del contenido de la certificación de eficiencia energética de edificios.
- b. Incremento de la calidad de esta.
- c. Establecimiento de la obligación para empresas inmobiliarias de mostrar el certificado de eficiencia energética de los inmuebles que alquilen o vendan.

### 3.1.2. Código técnico de la edificación (CTE)

El Código Técnico de la Edificación (CTE) es el marco normativo que establece las exigencias básicas de calidad que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad establecidos en la Ley 38/1999 de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación (LOE).

El Real Decreto que regula el Código Técnico de la Edificación (Parte I), se complementa con los Documentos Básicos (Parte II), que determinan la forma y condiciones en las que deben cumplirse las exigencias para alcanzar la calidad adecuada en los edificios.

### 3.1.3. Real Decreto 737/2020

El Real Decreto 737/2020, de 4 de agosto, regula el programa de ayudas para las actuaciones de rehabilitación energética en edificios existentes con un doble objetivo, en primer lugar, reducir el consumo de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> del parque inmobiliario, y en segundo favorecer la reactivación económica para superar la crisis económica generada por el COVID-19.

Dichas ayudas deberán destinarse a mejoras de edificios existentes, de cualquier uso, construidos antes del año 2007, agrupándose las actuaciones subvencionales en tres grupos:

- a) Mejora de la eficiencia energética de la envolvente térmica.
- b) Mejora de la eficiencia energética y uso de energías renovables en las instalaciones térmicas de calefacción, climatización, refrigeración, ventilación y agua caliente sanitaria.
- c) Mejora de la eficiencia energética de las instalaciones de iluminación.

En el RD se especifican claramente cada una de las actuaciones y los requisitos a cumplir por parte de estas para ser subvencionables, así como los porcentajes que cubrirán las ayudas. También se indica la documentación necesaria para su justificación y los plazos para su solicitud y la ejecución de las mejoras.

### 3.1.4. Real Decreto 1027/2007

El Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE), establece las condiciones que deben cumplir las instalaciones destinadas a atender la demanda de bienestar térmico e higiene a través de las instalaciones de calefacción, climatización y agua caliente sanitaria, para conseguir un uso racional de la energía.

El RITE establece diversas exigencias en eficiencia energética como, por ejemplo:

- a) Rendimientos energéticos en los equipos de generación de calor y frío, así como los destinados al movimiento y transporte de fluidos.
- b) Condiciones de aislamiento en los equipos y conducciones de los fluidos térmicos.
- c) Condiciones de regulación y control para mantener las condiciones de diseño previstas en los locales climatizados.
- d) Utilización de energías renovables disponibles, en especial energía solar y biomasa.
- e) Incorporación de subsistemas de recuperación de energía y aprovechamiento de energías residuales.
- f) Sistemas obligatorios de contabilización de consumos en el caso de instalaciones colectivas.
- g) Desaparición gradual de combustibles sólidos más contaminantes.
- h) Desaparición gradual de equipos generadores menos eficientes.

Como se ha mencionado en los apartados anteriores, un gran porcentaje de los edificios del barrio del Raval fueron construidos antes de aplicación del Código Técnico de la Edificación (CTE) lo que hace que la normativa RITE es inaplicable a la edificación a la que se orientan las soluciones propuestas por la organización de Oasiurbà.

Además, debido a que las soluciones de rehabilitación no implican la rehabilitación de más del 60% de las viviendas, estas estarán fuera del alcance del Código Técnico de la Edificación (CTE).

## 4. Estudio experimental

En esta investigación se pretende determinar las propiedades térmicas de los prototipos propuestos por la Asociación Oasiurbà y de un grupo de materiales domésticos que están al final de su vida útil pero que aún presentan propiedades térmicas aprovechables. El presente estudio se centra en determinar si los materiales en cuestión presentan características prometedoras que puedan justificar futuras investigaciones.

Existen varios métodos para la determinación de las propiedades térmicas de los materiales aislantes como son; el método de Heat Flow Meter (HFM) y el método de la Caja Caliente (Hot-Box).

### 4.1. Métodos de evaluación

#### 4.1.1. Cálculo teórico

El valor de U se puede calcular con el enfoque teórico regulado por ISO 6946 basado en una analogía eléctrica y condiciones de estado estacionario. Una vez conocidas las propiedades del material a ensayar, el valor U se puede determinar según la ecuación:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + \sum_i \frac{L_i}{k_i} + R_{se}} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Dónde: U representa el valor de la transmitancia térmica evaluada por el método de cálculo [ $\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$ ];  $L_i$  el espesor de la capa i-ésima [m];  $k_i$  su conductividad térmica [ $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ];  $R_T$  la resistencia térmica total de la pared [ $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ]; y  $R_{si}$  y  $R_{se}$  las resistencias superficiales interior y exterior [ $\text{m}^2\text{-K}/\text{W}$ ], respectivamente

Sin embargo, el método de cálculo no representa con exactitud el valor de U si se tienen en cuenta diversos factores, como las estimaciones incorrectas de las propiedades de los materiales, las diferencias entre el laboratorio ideal y los entornos reales, y la mano de obra [28].

#### 4.1.2. Heat flow meter

La transmitancia térmica en las paredes (o la resistencia térmica total) puede evaluarse mediante el método HFM, que es una técnica experimental normalizada (las mediciones deben realizarse según la norma ISO 9869-1). Este enfoque experimental requiere el registro de los flujos de calor que atraviesan la pared y las diferencias de temperatura del aire entre el interior y el exterior, basándose en mecanismos de transmisión de calor bien conocidos. El valor U (o el valor R) es el coeficiente de transferencia de calor que relaciona el flujo de calor con la diferencia de temperatura y se puede determinar según la siguiente ecuación;

$$q = U \cdot (T_i - T_e) = \frac{T_i - T_e}{R_T} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Dónde:  $q$  = Densidad de flujo térmico [ $\text{W}/\text{m}^2$ ];  $U$  = Transmitancia térmica de la pared [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ];  $T_i$  = Temperatura del aire interior [K];  $T_e$  = Temperatura del aire exterior [K];  $R_T$  = Resistencia térmica total de la pared, [ $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ].

En un medidor de flujo térmico (HFM), la muestra de ensayo se coloca entre dos placas calentadas y controladas a una temperatura media de la muestra y una caída de temperatura definidas por el usuario para medir el calor que fluye a través de la muestra. El grosor de la muestra ( $L$ ) corresponde a la dimensión real de la muestra o para ajustarse al grosor deseado de una muestra comprimible. El flujo de calor ( $Q$ ) a través de la muestra se mide mediante dos transductores de flujo de calor calibrados que cubren una amplia zona de ambos lados de la muestra.

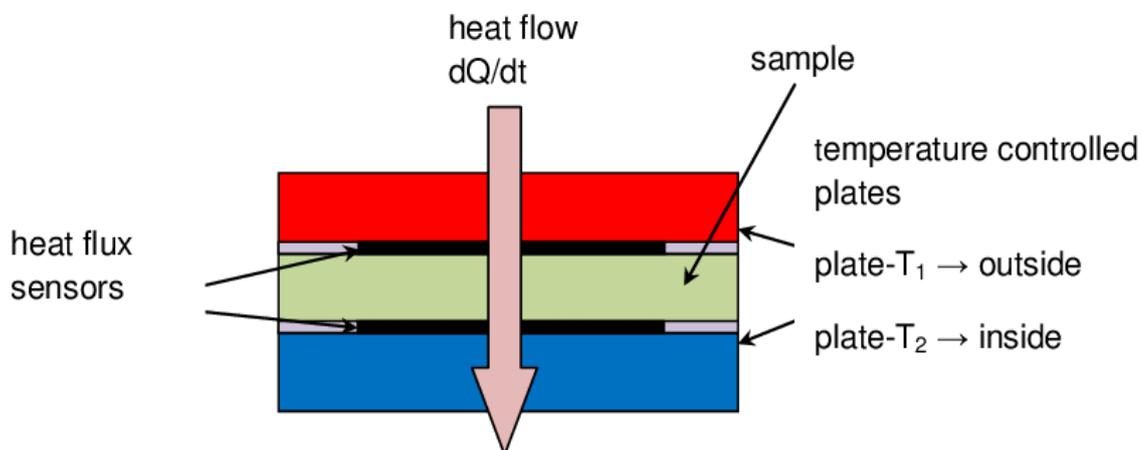


Figura 4.1 – Esquema del funcionamiento del medidor de flujo térmico para la medición de la conductividad térmica de una muestra

Una vez alcanzado el equilibrio térmico, se realiza la prueba. La salida del transductor de flujo térmico se calibra con un patrón. Para el cálculo de la conductividad térmica ( $\lambda$ ) se utiliza el valor medio del flujo de calor y de la resistencia térmica R, de acuerdo con la Ley de Fourier.

#### 4.1.3. Caja Caliente

Una caja caliente es un aparato diseñado para determinar el coeficiente de transmisión de calor y resistencia térmica de paneles de construcción (ASTM, 2011), (INEN, 2014), (ISO, 2010). Su funcionamiento se basa en mantener una diferencia de temperatura sobre ambas caras del espécimen, con propiedades térmicas conocidas, y a través de este permitir el paso de un flujo de calor constante.

Según el método de ensayo de la caja caliente, la muestra se sitúa entre dos cámaras: la cámara de medición y la cámara climática. La cámara de medición se utiliza para simular el ambiente interior (lado caliente), mientras que la cámara climática se utiliza para simular el ambiente exterior (lado frío). La resistencia térmica del panel se puede evaluar utilizando el flujo de calor medido desde el lado de la cámara de medición hasta el lado de la cámara climática que atraviesa la muestra, y la diferencia de temperatura medida entre los lados caliente y frío.

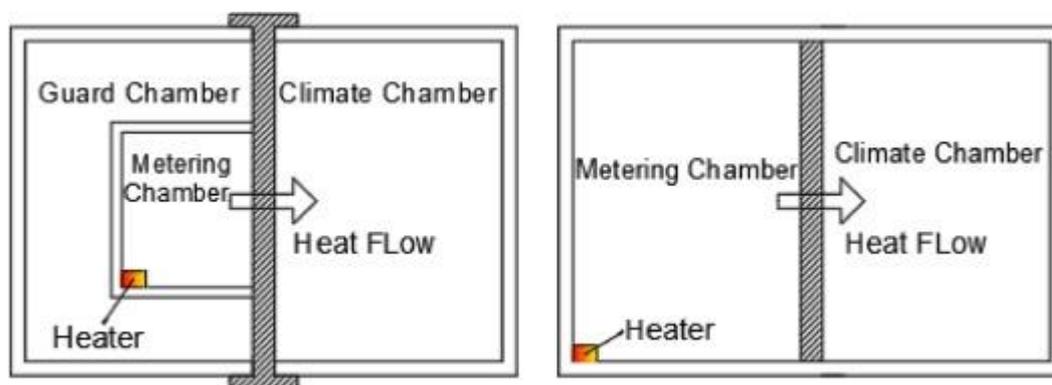


Ilustración 4.1 – Caja caliente protegida (izquierda) y Caja caliente calibrada (derecha) [30]

Actualmente existen varios diseños y tipos de cajas calientes que se utilizan en los ensayos experimentales. En general, estos diferentes diseños pueden dividirse en dos grupos: caja caliente protegida (Guarded Hot Box - GHB) y caja caliente calibrada (Calibrated Hot Box - CHB). La GHB es el método más utilizado en Norteamérica y en Europa mientras que la CHB es más utilizado un entorno de investigación. Otros tipos de cajas calientes son la caja caliente de pared y la caja caliente de borde. Se trata de una combinación de la CHB y la GHB.

A continuación, se puede observar las diferencias que hay entre los dos tipos de cajas calientes.

Tipo de Caja Caliente	Ventajas	Desventajas
Caja Caliente Guardada	Mayor exactitud en los datos obtenidos. Minimiza el intercambio de calor directo desde la caja de medida hacia el ambiente. Disminuye el flujo de calor lateral de la probeta. Potencia calorífica dirigida directamente hacia el espécimen.	Costo elevado. Sistema de Control que demanda una mayor complejidad. Mayor número de equipos dentro de la zona caliente.
Caja Caliente Calibrada	Rápido ensamble en cada ensayo a realizar. Sistema de calefacción simple. Menos equipos dentro de la zona caliente, por lo tanto, menor calor aportado por equipos adicionales.	Pérdida de calor de la caja de medida hacia el medio externo o ambiente. Potencia calorífica no unidireccional hacia el espécimen. Mayor pérdida lateral de calor

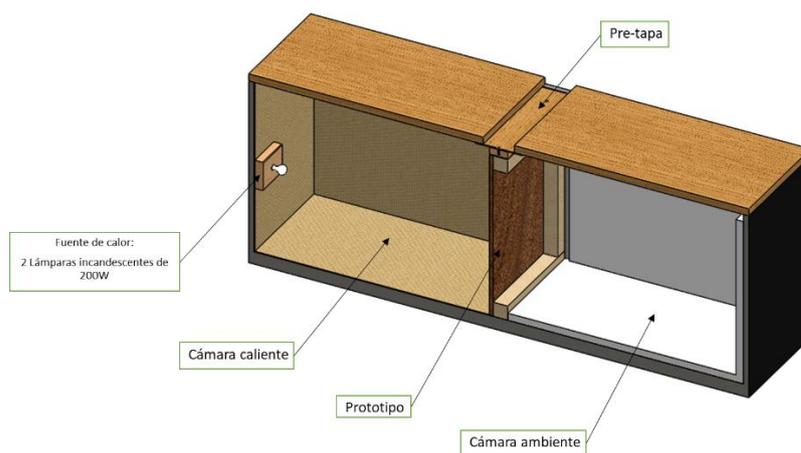
Figura 4.2 - Principales diferencias entre GHB y CHB

## 4.2. Cámara de ensayo

Los ensayos realizados para determinar las propiedades térmicas de los materiales aislantes presentados en la sección 4.4 siguieron la técnica de la caja caliente mencionado en el punto anterior. Para este método, se estimó el flujo de calor entre los lados caliente y frío de la caja utilizando un sensor de flujo térmico (sección 4.3.2). La cámara está compuesta por una caja rectangular con soportes (molduras) en la parte central de la misma que servirá para facilitar el montaje de los prototipos.

La primera cámara (denominada "cámara caliente") fue aislada con planchas de corcho de 2 mm para aislarla del clima exterior. En este lado de la cámara, se colocaron dos lámparas incandescentes de 200 W que serán la fuente de calor del sistema.

La segunda cámara (denominada "cámara ambiente") se aisló con planchas de poliestireno expandido (EPS) de 20 mm que ayudan a estabilizar la temperatura interior de la cámara y evitar la transferencia de energía entre el interior de la cámara y la temperatura ambiente. De esta manera, el flujo de calor es menos dependiente de las condiciones climáticas externas, mejorando así las condiciones térmicas de estado estacionario entre los dos lados de la caja.



*Ilustración 4.2 - Cámara de ensayo (Elaboración propia)*

#### 4.2.1. Preparación de la cámara de ensayo

La Ilustración 4.3 muestra el diseño y estado inicial de la cámara que la Asociación de Oasiurbà nos ha facilitado para realizar el estudio de transmitancia térmica de los prototipos. La cámara tiene dimensiones exteriores de 1365 mm de largo, 645 mm de ancho y 515 mm de alto. Esta cámara se utilizará para evaluar los prototipos de rehabilitación diseñados para las paredes y los techos.



*Ilustración 4.3 - Estado inicial de la cámara de ensayo (Elaboración propia)*

Para lograr un resultado más preciso en los ensayos, la cámara debe ser lo suficientemente segura para que haya la menor pérdida de calor posible durante el proceso de la experimentación. Para ello, la hermeticidad entre los dos lados, la base y las paredes de la cámara de ensayo debe estar térmicamente asegurada.

Para conseguir un determinado nivel de hermeticidad, se han utilizado los siguientes elementos:

➤ Cinta vinílica

La cinta aislante (conocida también como cinta aisladora o cinta de aislar) es un tipo de cinta adhesiva de presión usada principalmente para aislar empalmes de hilos y cables eléctricos. Este tipo de cinta es capaz de resistir condiciones de temperaturas extremas, corrosión, humedad y altos voltajes. La cinta está fabricada en material de PVC delgado, con un ancho generalmente de 14 mm; uno de los lados de la cinta está impregnado con un adhesivo. El PVC ha sido elegido por ser un material de bajo costo, flexible y tener excelentes propiedades de aislante eléctrico, aunque posee la desventaja de endurecerse con el tiempo y el calor.



*Ilustración 4.4 - Cinta adhesiva de presión*

➤ Rollos de Corcho (2mm)

El corcho es un material que se obtiene de la corteza de un árbol, el alcornoque, o más exactamente de la capa exterior del tronco de los árboles, de la que se extrae periódicamente sin dañar el árbol, normalmente cada 9-12 años, para asegurar que la capa de corcho alcance el grosor mínimo requerido.

La composición del corcho varía en función del origen geográfico, las condiciones climáticas y del suelo, el origen genético, las dimensiones del árbol, la edad y las condiciones de crecimiento. Sin embargo, en general, el corcho está compuesto por suberina (una media de alrededor del 40%), lignina (22%), polisacáridos (celulosa y hemicelulosa) (18%), extraíbles (15%) y otros (5%).

El coeficiente de conductividad térmica de esta aislante ronda entre 0,030 W/m·k – 0,040 W/m·k para una densidad de 120 kg/m<sup>3</sup> y, además, debido a la alta inercia térmica del corcho, son resistentes al fuego. En contraste con los otros materiales, el corcho conserva propiedades de aislamiento en un amplio rango de temperaturas.



*Ilustración 4.5 - Rollo de corcho*

➤ Planchas de Poliestireno Expandido (20mm)

El poliestireno expandido (EPS, del inglés expanded polystyrene) es un material plástico espumado, derivado del poliestireno.

Aproximadamente un 98% del volumen del material es aire y únicamente un 2% es materia sólida (poliestireno). El EPS es una espuma rígida y resistente de célula cerrada con una densidad normal de 11 a 32 kg/m<sup>3</sup>. Derivado de las anteriores propiedades físicas, se convierte en un producto ultraligero y suelen ser de color blanco y formado por perlas de poliestireno pre-expandido.

La conductividad térmica del EPS se mide según la norma EN 12667. Los valores típicos oscilan entre 0,032 y 0,038 W/m·K en función de la densidad de la placa de EPS. El valor de 0,038 W/m·K se obtuvo a 15 kg/m<sup>3</sup> mientras que el valor de 0,032 W/m·K se obtuvo a 40 kg/m<sup>3</sup> según la hoja de datos del K-710 de StyroChem Finland.

Densidad kg/m <sup>3</sup>	Conductividad Térmica - W/m·K	
	Media	Prevista
<b>10</b>	0,043	0,047
<b>18</b>	0,036	0,038
<b>20</b>	0,035	0,037
<b>22</b>	0,034	0,036
<b>25</b>	0,034	0,035
<b>28</b>	0,033	0,035
<b>30</b>	0,033	0,035

*Tabla 4.1 - Conductividad térmica de EPS*

En la Tabla 4.1, se indican los valores más habituales de la conductividad térmica, para una serie de densidades recomendadas. La tabla indica los valores obtenidos siguiendo las normas de ensayo UNE-EN 12667 y UNE-EN 12939.



*Ilustración 4.6 - Planchas de EPS*

#### **4.2.1.1. Proceso de fabricación**

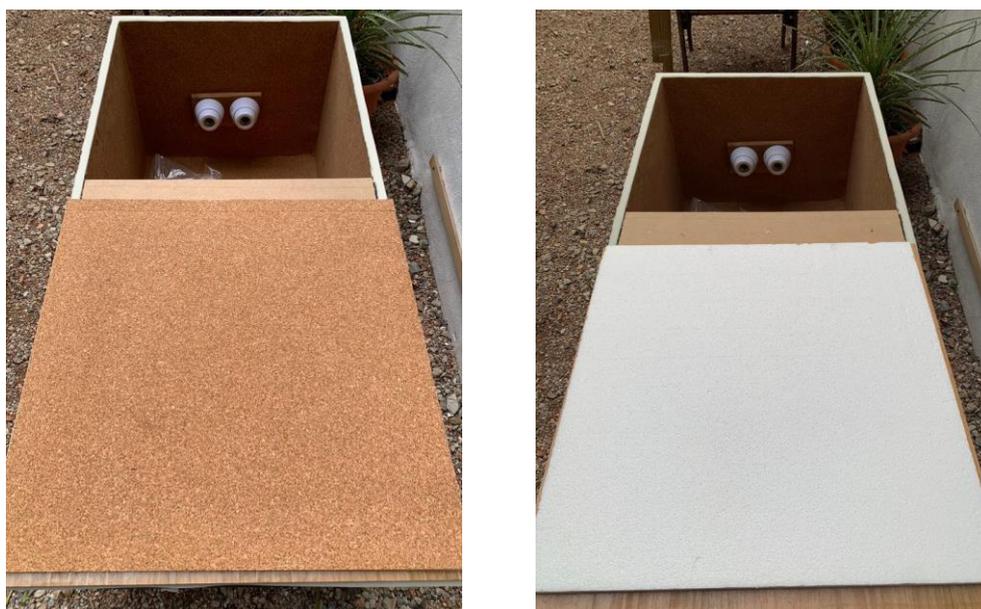
En primer lugar, se aplica la cinta vinílica en las esquinas de la cámara. Esto asegurará y minimizará cualquier pérdida de calor que pueda producirse en las uniones entre los elementos aislantes. Después de asegurar los cantos de la cámara, se aplica el material aislante de corcho y el poliestireno expandido en la base y las paredes interiores de la cámara. Como se puede observar en la Ilustración 4.7, se utilizaron diferentes tipos de materiales aislantes en los dos lados de la cámara.

En un lado, denominado “cámara caliente”, aplicamos aislantes de corcho, ya que será el lado donde se ubicará la fuente de calor y debe resistir hasta una temperatura de aproximadamente 80°C. Mientras que, en el otro lado, denominado “cámara ambiente”, utilizamos planchas de poliestireno expandido para aislar el calor que pasa a través de los prototipos y evitar que se propague por el exterior. Dado que este material presenta una excelente capacidad de aislamiento térmico frente al calor y al frío debido a la propia estructura del material, esto permitirá que el calor que pasa a través de los paneles se acumule en este lado de la cámara.



*Ilustración 4.7 – Cámara caliente (derecha) y Cámara ambiente (izquierda) (Elaboración propia)*

En segundo lugar, para evitar cualquier pérdida de calor en las cubiertas de la cámara de ensayo, también se han colocado materiales aislantes en la superficie interior de las cubiertas, tal como se muestra en la Ilustración 4.8.



*Ilustración 4.8 - Cubiertas de la cámara de ensayo (elaboración propia)*

Para acabar, debido a que la dimensión de las cubiertas no es suficiente para cubrir toda la cámara de ensayo, se ha fabricado un elemento llamado “pre-tapa”. Dicha pre-tapa tiene como función unir las dos cubiertas y evitar las pérdidas que puede haber a la parte central de la cámara.

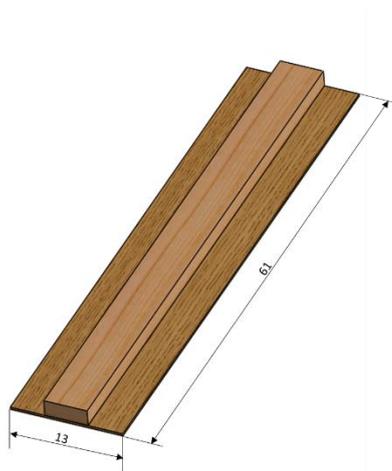


Ilustración 4.9 - Dimensiones de la pre-tapa (Elaboración propia)

En el Anexo B se puede ver las dimensiones y los elementos del cual esta compuesta la pre-tapa fabricada.

#### 4.2.2. Instalación de la fuente de calor

Después de aislar el interior de la cámara climática, se ha procedido a la instalación de la fuente de calor del sistema. Puesto que se espera que las pruebas tengan una duración bastante larga y ante la ausencia de cualquier tipo de orificios que nos permitan saber si las fuentes de calor siguen en funcionamiento, se ha optado por una conexión en paralelo para conectar las fuentes de calor. De esta manera, en caso de que se produzca algún problema con una de las fuentes durante la prueba, podemos evitar que afecte al funcionamiento de la otra fuente. Además, esta conexión es más seguro y reduce el riesgo de incendio ya que sólo la cantidad de corriente requerida por un dispositivo se suministra a un dispositivo.

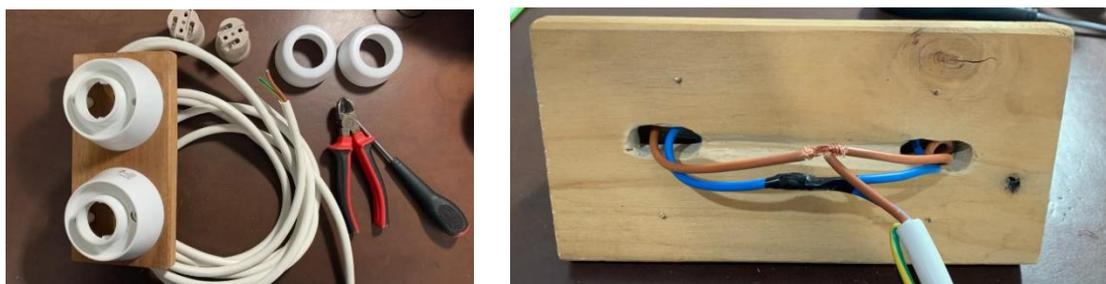


Ilustración 4.10 - Conexión de la fuente de calor del sistema (Elaboración propia)

Finalmente, una vez acabada la conexión eléctrica de las dos fuentes de calor, se procede a colocarlos a una altura de 220 mm dentro de la cámara climática tal como se puede observar en la Ilustración 4.11.



*Ilustración 4.11 - Posicionamiento de la fuente dentro de la cámara de ensayo*

### **4.3. Elementos de medición**

Para este estudio se han utilizado dos dispositivos de medición: el sensor de temperatura y el sensor de flujo de calor. El sensor de temperatura tiene una precisión de  $\pm (0,5\% + 0,5 \text{ }^\circ\text{C})$  y el sensor de flujo térmico tiene una precisión del 0,1% tras la calibración en fábrica.

#### **4.3.1. Sensor de temperatura**

Para registrar la temperatura en ambos lados de la cámara de ensayo durante el experimento, se ha utilizado el modelo SD200 de Extech Instruments. Este dispositivo es un registrador de datos de temperatura de 3 canales que muestra y almacena las lecturas de temperatura de una de las tres sondas de temperatura tipo K.

El medidor graba los datos en una tarjeta SD, integrado en el dispositivo, en formato Excel que facilita la transferencia de datos a un PC. Además, dispone de varias frecuencias de muestreo de datos de 5, 10, 30, 60, 120, 300, 600 segundos o de forma automática.

➤ Características del dispositivo:

- LCD triple que indica simultáneamente 3 canales de temperatura (tipo K)
- Tasa de muestreo de datos elegible: 5, 10, 30, 60, 120, 300, 600 segundos
- Baterías alcalinas 6 AAA (UM4) o baterías para servicio pesado de 1.5 V o adaptador CA 9V
- Escala de temperatura de -50 a 1300 °C / -58 a 2372 °F con resolución de 0.1 °C/°F
- Registrador de datos marca Fecha/Tiempo y guarda las lecturas en tarjeta SD en formato Excel® para facilitar su transferencia a una PC
- Humedad de operación menor de 85% de humedad relativa
- Dimensiones de 132 x 80 x 32 mm

➤ Configuraciones previas:

Antes de proceder a la realización de cualquier tipo de mediciones con el dispositivo, se deberá efectuar una serie de configuraciones previas en el mismo. El modelo SD200 de Extech tiene una serie de funciones que deben de ser ajustadas antes del ensayo como la fecha y la hora, la tasa de muestreo, el signo de decimales, la selección de las unidades de temperatura y, por último, la opción de activar o desactivar el sonido zumbador.

En el presente estudio, el dispositivo se ha configurado de tal manera que registre los datos cada 60s. También se ha desactivado la opción del sonido del zumbador para evitar causando molestias a los arquitectos de la organización de Oasiurbà.

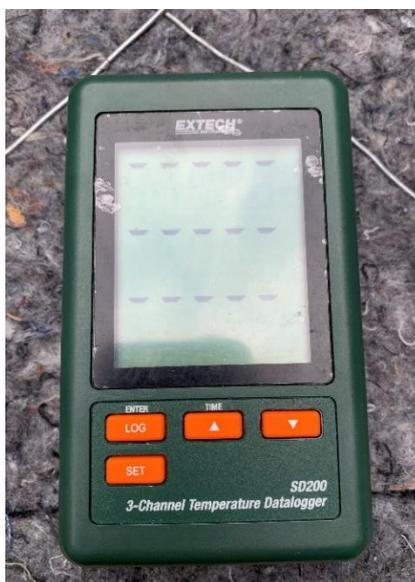


Ilustración 4.12 - Sensor de temperatura superficial (Elaboración propia)

### 4.3.2. Sensor de flujo de calor

En cuanto al registro de la cantidad de transferencia de calor que pasa a través de los casos a ensayar, se ha utilizado el modelo LI19 Datalogger y el sensor HFP01 de HukseFlux. El LI-19 Datalogger normalmente se utiliza para visualizar la radiación solar o el flujo de calor medido. Una vez programado con la sensibilidad del sensor conectado (en nuestro caso el sensor HFP01), la pantalla mostrará el valor real del flujo de calor o la radiación solar en  $W/m^2$ .

El HFP01 mide el flujo de calor a través del objeto en el que está incorporado o sobre el que está montado, en  $W/m^2$ . Es una termopila que mide la diferencia de temperatura a través del cuerpo compuesto de cerámica y plástico del HFP01. Estos sensores se pueden conectar directamente a los sistemas de registro de datos habituales (como el LI-19). El flujo de calor en  $W/m^2$  se calcula dividiendo la salida del HFP01, una pequeña tensión, por la sensibilidad. La sensibilidad se proporciona con el HFP01 en su certificado de calibración.

➤ Características del equipo

<b>HFP01</b>	
<b>Rango de medición</b>	-2000 a +2000 $W/m^2$
<b>Sensibilidad (nominal)</b>	$60 \times 10^{-6} V/(W/m^2)$
<b>Resistencia térmica del sensor</b>	$71 \times 10^{-4} K/(W/m^2)$
<b>Incertidumbre de calibración</b>	$\pm 3 \% (k = 2)$
<b>Rango de temperatura de funcionamiento nominal</b>	-30 a +70 °C



Figura 4.3 - Características del modelo HFP01 (Elaboración propia)

<b>LI19 Datalogger</b>	
<b>Incertidumbre de calibración</b>	0.1 %
<b>Dependencia de la temperatura</b>	< 0.5 % + $3 \times 10^{-6}$ V sobre el rango nominal
<b>Definición de medición almacenada</b>	mínimo máximo y promedio durante el intervalo de almacenamiento con conversión a W/m <sup>2</sup>
<b>Capacidad de almacenamiento</b>	3518 mediciones
<b>Rango de intervalos de almacenamiento</b>	2 a 65535s (seleccionable)
<b>Rango de temperatura de funcionamiento nominal</b>	-10 a +40 °C
<b>Interfaz de usuario en PC</b>	LI19 software
<b>Dimensiones LI19</b>	(70 x 146 x 25) mm
<b>Tipo de batería</b>	2 x AA



Figura 4.4 - Características del registrador LI-19 (Elaboración propia)

#### ➤ Configuraciones previas

El modelo LI19 Datalogger permite programar, mediante el uso de software de este Datalogger, la sensibilidad del sensor para que la lectura muestre las unidades en W/m<sup>2</sup>, en lugar de milivoltios o microvoltios. Para ello, se requiere una interfaz USB que se utiliza para conectar el LI-19 a un PC. Aparte de la sensibilidad del sensor, el software también permite definir el intervalo de registro de datos y el factor de amplificación máximo de la etapa de entrada del LI-19.

Además del programa del Datalogger, el equipo de medición también incluye un Excel de cálculo para la determinación de los parámetros iniciales que posteriormente será enviado al mismo registrador antes empezar la toma de datos.

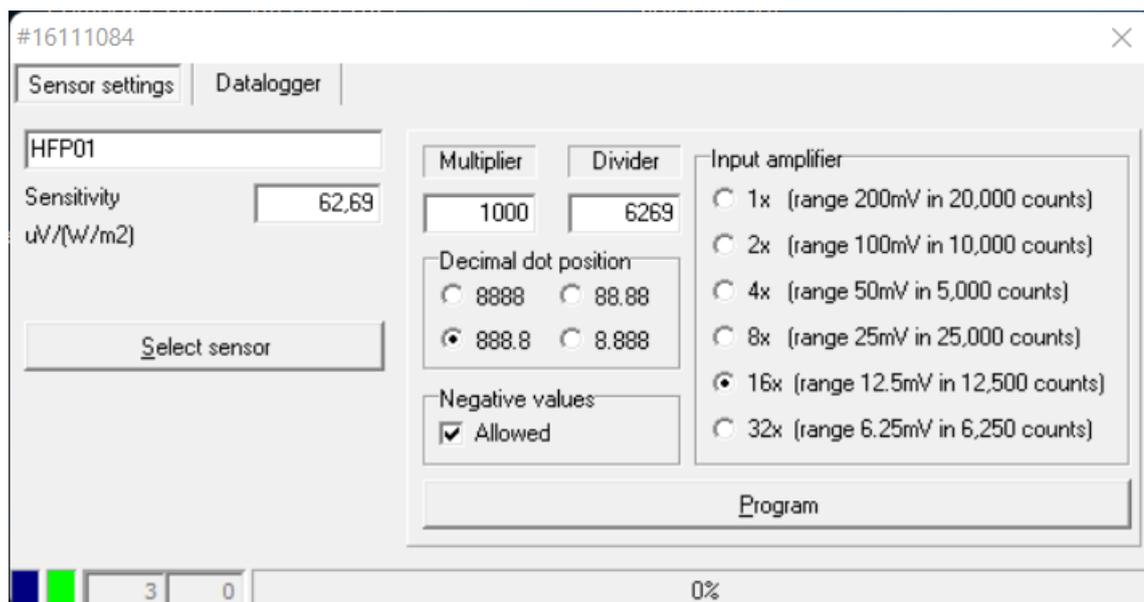


Ilustración 4.13 - Configuración inicial del sensor de flujo de calor (Elaboración propia)

En el Anexo A se puede ver el certificado de calibración del sensor que se ha utilizado en el presente estudio.

#### 4.4. Preparación de los aislantes

En el siguiente apartado, se detalla el proceso de preparación de los materiales aislantes mediante ilustraciones representativas reales del proceso. Para este estudio, y después de los estudios realizados anteriores mediante las simulaciones CFD, se ha decidido evaluar los siguientes materiales aislantes:

- Aislamiento de poliamida textil proveniente de mascarillas recicladas
- Aislamiento de algodón
- Cartones de huevos

Debido a que el algodón es un material que actualmente está disponibles en el mercado, este solo se debe cortar según las medidas internas de los paneles para su evaluación.

#### 4.4.1. Aislamiento de poliamida textil proveniente de mascarillas higiénicas

Para la preparación de este material aislante, se ha utilizado los siguientes instrumentos:

- Una pesa digital



Ilustración 4.14 - Pesa digital (Elaboración propia)

- Un rotulador
- Dos cajas de bolsas de plástico



Ilustración 4.15 - Elementos de empaquetamiento y marcaje (Elaboración propia)

Como se ha mencionado en los apartados anteriores, los experimentos se realizarán variando algunos parámetros de los aislantes. Para la evaluación de este material aislante, se han establecido unas densidades de 25, 40 y 60 kg/m<sup>3</sup> como referencia para realizar el pesaje del material. De ahora en adelante, estas variaciones se llamarán MR25, MR40 y MR60.

Una vez obtenidos los materiales necesarios y teniendo en cuenta las dimensiones del prototipo a utilizar, se procede al pesaje del material aislante. Para ello, el cálculo del peso necesario para las densidades anteriormente establecidas sigue la formula siguiente:

$$\varrho = \frac{m}{V} \rightarrow m = \varrho \times V \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Dónde:  $V$  = Volumen interior del prototipo [ $\text{m}^3$ ];  $\varrho$  = Densidad establecida [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];  $m$  = Masa de la muestra [ $\text{kg}$ ]

En la Tabla 4.2 se puede observar el peso de cada variante según la densidad establecida.

<b>Mascarillas Recicladas - Panel DM de 40mm</b>			
	Densidad ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Volumen ( $\text{cm}^3$ )	Peso (g)
<b>MR25</b>	25	8320	208
<b>MR40</b>	40	8320	332,8
<b>MR60</b>	60	8320	499,2
<b>TOTAL</b>	-	-	1040

Tabla 4.2 - Peso necesario para cada densidad establecida (Elaboración propia)

A continuación, se representarán ilustraciones del proceso de la preparación del material aislante:





Ilustración 4.16 - Proceso de la preparación del material (Elaboración propia)

La preparación de este material se ha llevado a cabo en el laboratorio de l'Escola d'Enginyeria de Barcelona Est - UPC y posteriormente llevado a la oficina de la Asociación de Oasiurbà para ser evaluadas. Inicialmente tenemos una bolsa de mascarillas quirúrgicas trituradas que posteriormente se pesaran en 20, 50 y 100 gramos y se empaquetan en 10 bolsas cada una.

#### 4.4.2. Cartones de huevos reciclados

Las hueveras y las bandejas pueden estar hechas de diferentes materiales, como plástico, papel reciclado o cartón, pero lo que las distingue es su forma. Aunque se ha investigado principalmente el rendimiento acústico de las hueveras, todavía hay varios estudios centrados en sus propiedades mecánicas [31].

A pesar de que las cajas de huevos por sí solas no proporcionan suficiente resistencia térmica debido a su limitado grosor, su estructura las hace adecuadas para ser rellenas con materiales fibrosos. Para el presente trabajo, este material será evaluado en combinación con el aislante de poliamida textil proveniente de mascarillas higiénicas.

Con el fin de poder llevar a cabo el estudio con los cartones de huevos, es necesario que tengan las medidas internas del prototipo. Las cajas de huevos utilizados para los ensayos tienen una dimensión inicial de 300 x 300 mm mientras que los prototipos fabricados tienen una dimensión de 520 x 400 x 40 mm.

A continuación, se representarán ilustraciones del proceso su preparación:



*Ilustración 4.17 - Preparación de los cartones de huevos (Elaboración propia)*

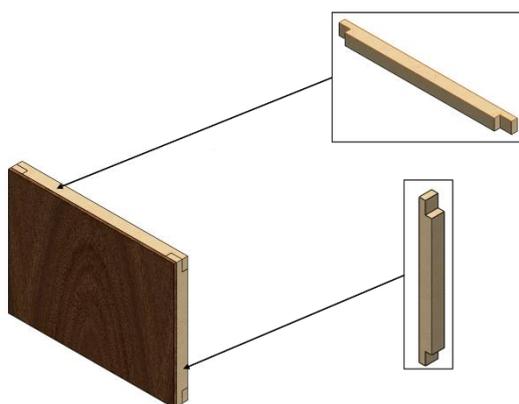
#### 4.5. Prototipo diseñado para paredes y techos

Considerando que la cámara climática tiene unas medidas establecidas, los prototipos se fabricaron de forma que encajaran perfectamente en la cámara de ensayos.

En el presente trabajo se utilizó un panel de 600 x 455 x 40 mm para estudiar la resistencia y transmitancia térmica del aislamiento reciclado presentado en la sección 4.4. Este panel está compuesto por una plancha de DM de 10 mm de espesor y cuatro listones de madera de sección 40 x 40 mm<sup>2</sup>.

A continuación, se detalla el proceso de fabricación del panel autoportante de DM de 10 mm.

- En primer lugar, se tendrá listones de madera con una sección de 40 x 40 mm<sup>2</sup> y de 3000 mm de longitud y un panel de 2440 mm de alto por 600 mm de ancho por 10 mm de espesor.
- En segundo lugar, se procede a cortar el panel con la medida adecuada para que encaje perfectamente dentro de la cámara de ensayo. Todos los prototipos tendrán una sección de 600 x 455 mm<sup>2</sup>.
- En tercer lugar, se cortarán los listones con las medidas de la altura y la anchura de la plancha de DM ya cortada.
- Para acabar, se procede a unir los marcos del prototipo (los listones cortados) y la colocación del panel con el marco mediante unos torillos de Ø 3 x L25 mm.



*Ilustración 4.18 - Panel autoportante de DM10 (Elaboración propia)*

En el Anexo B se puede ver las dimensiones del prototipo utilizado en los ensayos realizados.

## 5. Metodología del ensayo

### 5.1. Ensayo térmico

Los prototipos para ensayar se instrumentaron con los sensores de temperatura presentado en la sección 4.3.1 para las mediciones de la temperatura superficial de los prototipos. Se instalaron dos sensores (termopares tipo k) en la posición central de los paneles, orientados hacia los lados caliente y ambiente de la cámara de ensayo.

Además, en la cara del lado ambiente del prototipo se fijó un sensor de flujo calor (modelo HFP01 fabricado por Hukseflux (sección 4.3.2)), junto con los sensores de temperatura para medir la cantidad del flujo calor que pasa a través de los prototipos. Estos se fijaron con cinta adhesiva que garantiza un buen contacto térmico entre todos los sensores y la superficie de la pared de la muestra. Todos los sensores se conectaron a un registrador de datos para realizar las lecturas automáticas.

Para cada uno de los casos estudiados, las mediciones de temperatura y flujo de calor se realizaron alrededor de 3 h para cada caso ensayado durante el mes de abril, y los datos se registraron en intervalos de 60 s. Durante el período de medición, la caja de ensayo estuvo expuesta a las condiciones climáticas exteriores locales entre temperaturas de 8 °C y 19 °C.

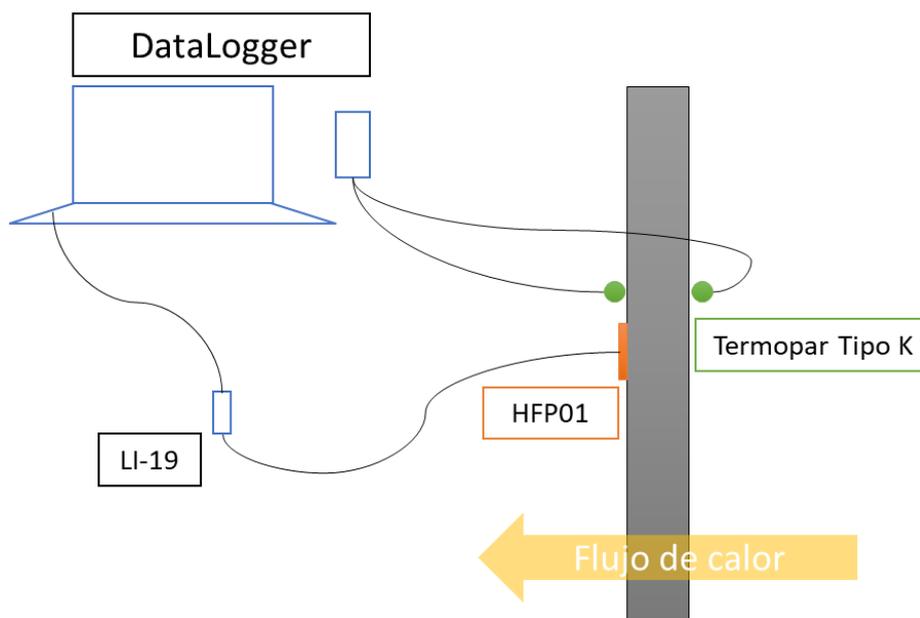


Ilustración 5.1 – Esquema de la prueba (Elaboración propia)

### 5.1.1. Configuraciones estudiadas

Una vez realizados los preparativos necesarios, se procede a la fase de experimentación de las actuaciones propuestas. Las configuraciones que se han ensayado en esta investigación pueden verse a continuación.

Casos estudiados							
Prototipo	Panel Autoportante DM de 10mm						
Casos	1	2	3	4	5	6	7
Material aislante	Algodón	Mascarillas	Mascarillas	Mascarillas	Mascarillas	Mascarillas	Mascarillas
		Recicladas	Recicladas	Recicladas	Recicladas	Recicladas	Recicladas
		- 25kg/m <sup>3</sup>	- 40kg/m <sup>3</sup>	- 60kg/m <sup>3</sup>	- 25kg/m <sup>3</sup>	- 40kg/m <sup>3</sup>	- 60kg/m <sup>3</sup>
					+ Cartón de huevo	+ Cartón de huevo	+ Cartón de huevo

Tabla 5.1 Configuraciones estudiadas (Elaboración propia)

Las pruebas se realizaron siguiendo los procedimientos que se presentan a continuación:

**Preparación de las muestras**

- Preparación de los materiales aislantes a ensayar
- Colocación de los materiales en la cavidad del prototipo fabricado

**Instalación de sensores**

- Fijación de los sensores de temperatura y de flujo de calor en el centro de las dos caras del prototipo

**Configuraciones previas de los sensores**

- Configuraciones previas de los sensores de temperatura y flujo calor como se explica en la sección 4.3

**Colocación de la muestra en la cámara de ensayo**

- Introducción de la muestra en la cámara climática
- Colocación del cubrimiento de la caja de ensayo

**Registro de datos**

- Puesta en marcha de la fuente de calor
- Comienzo del registro de datos durante un máximo de 3h

**Fin de la prueba**

- Recolección de datos para su posterior evaluación

Ilustración 5.2 - Preparaciones previas para cada ensayo realizado (Elaboración propia)

Factores para tener en cuenta:

- Con el fin de conseguir resultados más precisos, los sensores de temperatura deben colocarse a la misma posición para todos los ensayos.
- Para evitar las pérdidas de calor en los bordes de contacto entre las cubiertas y la cámara de ensayo, se han colocado burletes de espuma en los bordes de la cámara. Además, se coloca unos ladrillos encima de las cubiertas que comprime los burletes, reduciendo así las pérdidas de calor en la zona
- Se deben poner la misma cantidad de cintas adhesivas en todos los ensayos ya que estas pueden causar fluctuaciones en los datos que puede afectar los cálculos posteriores

Caso	Día	Duración del ensayo (min)	Temperatura exterior ambiente (máx.)	Temperatura exterior ambiente (min.)
1	05/04/2022	171	16 °C	8 °C
2	07/04/2022	140	16 °C	9 °C
3	08/04/2022	170	16 °C	8 °C
4	11/04/2022	182	17 °C	9 °C
5	12/04/2022	167	16 °C	9 °C
6	22/04/2022	172	18 °C	10°C
7	26/04/2022	188	119 °C	11 °C

Tabla 5.2 - Condiciones exteriores ambientales y duración de cada ensayo realizado [33]

## 5.2. Hipótesis del análisis térmico

La ecuación de conducción unidimensional en estado estacionario incluye el flujo de calor, el cambio de temperatura, las dimensiones físicas de los prototipos y la conductividad térmica. Una vez determinados estos parámetros en condiciones de estado estacionario, la transmitancia térmica puede calcularse basándose en la (Ec. 5.2. Para el cálculo de la transmitancia y la resistencia térmica es necesario conocer el flujo de calor que pasa a través de la muestra ( $q$ ), la diferencia de temperatura a través de la muestra ( $\Delta T$ ), y las dimensiones físicas de la muestra (espesor,  $\Delta x$ , y área de la sección transversal,  $A$ ).

En el presente trabajo, se establecieron las siguientes hipótesis para facilitar el análisis de los datos en estado estacionario:

- Se considera que la tasa de transferencia de calor ha alcanzado su régimen estacionario cuando  $q$  fluctúa dentro del rango de  $\pm 0,2 \text{ W/m}^2$
- No hay pérdidas de calor en las paredes de la cámara, por lo que el flujo de calor se considera unidimensional a través de las muestras
- La resistencia y la transmitancia térmica convergen hacia el correspondiente valor asintótico, aunque se ven afectados por los errores de medición y las condiciones meteorológicas
- Los efectos de la convección y la radiación pueden simplificarse y tratarse como la temperatura ambiente en ambos lados de la cámara de ensayo

### 5.3. Cálculo de la resistencia y transmitancia térmica

Una vez alcanzado el estado estacionario, los datos de las mediciones adquiridas se han procesado mediante el método del promedio. Este método se basa en la idea de que el promedio de las proporciones instantáneas de flujo de calor y diferencias de temperatura en una escala de tiempo en constante aumento suaviza las oscilaciones, lo que da como resultado el valor de estado estacionario de la transmitancia térmica.

Según este método, la resistencia térmica puede calcularse mediante la (Ec. 5.1, donde  $T_a$  es la temperatura de la cámara ambiental,  $T_c$  es la temperatura de la cámara caliente,  $q$  es el flujo de calor entre las dos caras del elemento sometido a ensayo.

$$R_n = \frac{\sum_{j-i}^n (T_{cj} - T_{aj})}{\sum_{j-i}^n q_j} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

La transmitancia térmica, también conocida como valor  $U$ , es el recíproco de la resistencia térmica total. Cuanto menor sea el valor  $U$ , mejor será la capacidad del aislamiento. Para determinar la transmitancia térmica, se aplicará la siguiente ecuación;

$$U_n = \frac{1}{R} \approx U_n = \frac{\sum_{j-i}^n q_j}{\sum_{j-i}^n (T_{cj} - T_{aj})} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

Afín de adquirir resultados más precisos, el valor de  $R$  y de  $U$  de la muestra se evaluó al menos en un período estacionario de la temperatura o del flujo de calor en lugar de los datos inmediatos registrados directamente por los sensores, a partir de su visualización en forma de hoja de cálculo. Además, se descartan aquellos datos cuyos valores de  $q$  son negativos puesto que estos provocan grandes oscilaciones en los resultados finales de la resistencia y transmitancia térmica.

#### 5.4. Análisis de errores

De la misma manera que con cualquier procedimiento experimental, hay que tener en cuenta la incertidumbre de los resultados finales. La precisión de los resultados depende de la precisión de los instrumentos utilizados, como los termopares, los sensores del flujo de calor y la fuente de calor. Las incertidumbres de las mediciones individuales podrían utilizarse para obtener una incertidumbre global de los resultados finales. El grosor de la muestra ( $\Delta x$ ), el área de la sección transversal de la muestra ( $A$ ), la diferencia de temperatura a través de la muestra ( $\Delta T$ ) y la tasa de transferencia de calor unidimensional a través de la muestra son algunas de las incertidumbres individuales ( $q$ ).

En el presente trabajo se ha utilizado la (Ec. 5.3 y la (Ec. 5.4 para determinar las incertidumbres totales causadas por los instrumentos (sensor de la temperatura y del flujo de calor) utilizados durante la realización de los ensayos.

$$R_{err,n} = \left| \frac{\delta R}{\delta \Delta T} \right| \cdot \varepsilon_{r,\Delta T} + \left| \frac{\delta \Delta T}{\delta q} \right| \cdot \varepsilon_{r,q} = \left| \frac{1}{\bar{q}} \right| \cdot \varepsilon_{r,\Delta T} + \left| \frac{-\overline{\Delta T}}{\bar{q}^2} \right| \cdot \varepsilon_{r,q} \quad (\text{Ec. 5.3})$$

Dónde:  $\varepsilon_{r,q}$  y  $\varepsilon_{r,\Delta T}$  = Incertidumbres de la medida de los sensores utilizados;  $\bar{q}$  = Media aritmética del flujo de calor medido [W/m<sup>2</sup>];  $\overline{\Delta T}$  = Media aritmética de la diferencia de temperatura [K];  $R_{err,n}$  = Incertidumbre de los resultados finales.

$$U_{err,n} = \left| \frac{\delta R}{\delta q} \right| \cdot \varepsilon_{r,q} + \left| \frac{\delta q}{\delta \Delta T} \right| \cdot \varepsilon_{r,\Delta T} = \left| \frac{1}{\overline{\Delta T}} \right| \cdot \varepsilon_{r,q} + \left| \frac{-\bar{q}}{\overline{\Delta T}^2} \right| \cdot \varepsilon_{r,\Delta T} \quad (\text{Ec. 5.4})$$

Dónde:  $\varepsilon_{r,q}$  y  $\varepsilon_{r,\Delta T}$  = Incertidumbres de la medida de los instrumentos utilizados;  $\bar{q}$  = Media aritmética del flujo de calor medido [W/m<sup>2</sup>];  $\overline{\Delta T}$  = Media aritmética de la diferencia de temperatura [K];  $U_{err,n}$  = Incertidumbre de los resultados finales.

La incertidumbre de los instrumentos utilizados se calcula según la ecuación;

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2}{n(n-1)}} \quad (\text{Ec. 5.5})$$

Dónde:  $\bar{X}$  = Media aritmética.

Sin embargo, la incertidumbre de la resistencia térmica y de la transmitancia se vieron afectados no solamente por estas dos mediciones individuales sino que también de otros factores como son; el flujo térmico que la fuente de calor utilizada entrega al ensayo, la energía que se disipa por las filtraciones de la cámara puesto que esta se ha elaborado de forma artesanal, la temperatura exterior en el que se encuentra la cámara de ensayo, la pérdida de funcionalidad de las lámparas incandescentes debido al gran uso de la misma y los errores que puede haber cometido durante el montaje de los instrumentos en los prototipos.

## 6. Resultados y análisis

Los valores de  $U$  y de  $R$  de las muestras se estimaron cada 60 segundos durante aproximadamente 3 h para cada caso a fin de asegurar el estado estacionario para determinadas condiciones del flujo de calor. En la Figura 6.1, se muestra el comportamiento de las de temperaturas medidas y del flujo de calor para los siete casos ensayados.

Estos gráficos proporcionan una ayuda visual para el comportamiento del sistema en función del tiempo, para poder juzgar con precisión si el sistema se encuentra en estado estacionario o no. Tal como se puede observar, tanto el flujo de calor que pasa a través de los prototipos como las temperaturas en los dos lados de la cámara de ensayo llegan en un punto en el que las fluctuaciones son mínimas, por lo que se puede considerar que el sistema ha llegado al estado de equilibrio. Para todos los ensayos, la duración media que tarda para llegar al estado estacionario es de aproximadamente 120 minutos.

En la Figura 6.1 observamos que, para todos los casos estudiados, la temperatura en la cámara caliente experimenta un incremento de entre 30 y 50 °C desde el inicio de la recogida de datos hasta finalizar el experimento debido al efecto de la fuente de calor que se encuentra en la cámara. Por otro lado, la cámara ambiente sufre una variación relativamente baja, de entre 4 y 10 °C desde el inicio del ensayo hasta la finalización de este, comparado con la cámara caliente debido a los prototipos que separan los dos lados de la cámara de ensayo. El gradiente medio de la temperatura entre los dos lados de la cámara de ensayo a lo largo del periodo de evaluación es más bajo en el caso 3 (49,3 °C), y más alto en el caso 6 (56,2 °C).

Dado que la cámara está situada en el exterior del edificio, durante la preparación de los casos a evaluar, el interior de la cámara de ensayo estuvo expuesta a la radiación solar. Esto hace que las temperaturas iniciales de los dos lados de la cámara varíen según el día y la temperatura exterior en el que se realiza cada ensayo.

En la Figura 6.2, se puede observar el incremento en las temperaturas que ha experimentado los dos lados de la cámara de ensayo desde el inicio de cada experimento hasta la finalización de estos. Como se puede apreciar, el incremento en las temperaturas disminuye significativamente en las últimas semanas de abril debido a la elevada temperatura ambiente del cual se ha ensayado cada caso (Tabla 5.2). Este efecto se puede ver claramente en el caso 7 que, como consecuencia de las elevadas temperaturas exteriores en el que se ha realizado el ensayo y la radiación solar en el que estuvo expuesta antes de comenzar los registros de datos, experimentó la variación más baja ( $\Delta T_c = 29,5$  °C y  $\Delta T_a = 0,3$  °C) comparado con los otros casos ensayados. Como consecuencia, el tiempo de equilibrio del sistema es mucho más reducido con  $t_{eq} = 105$  min.

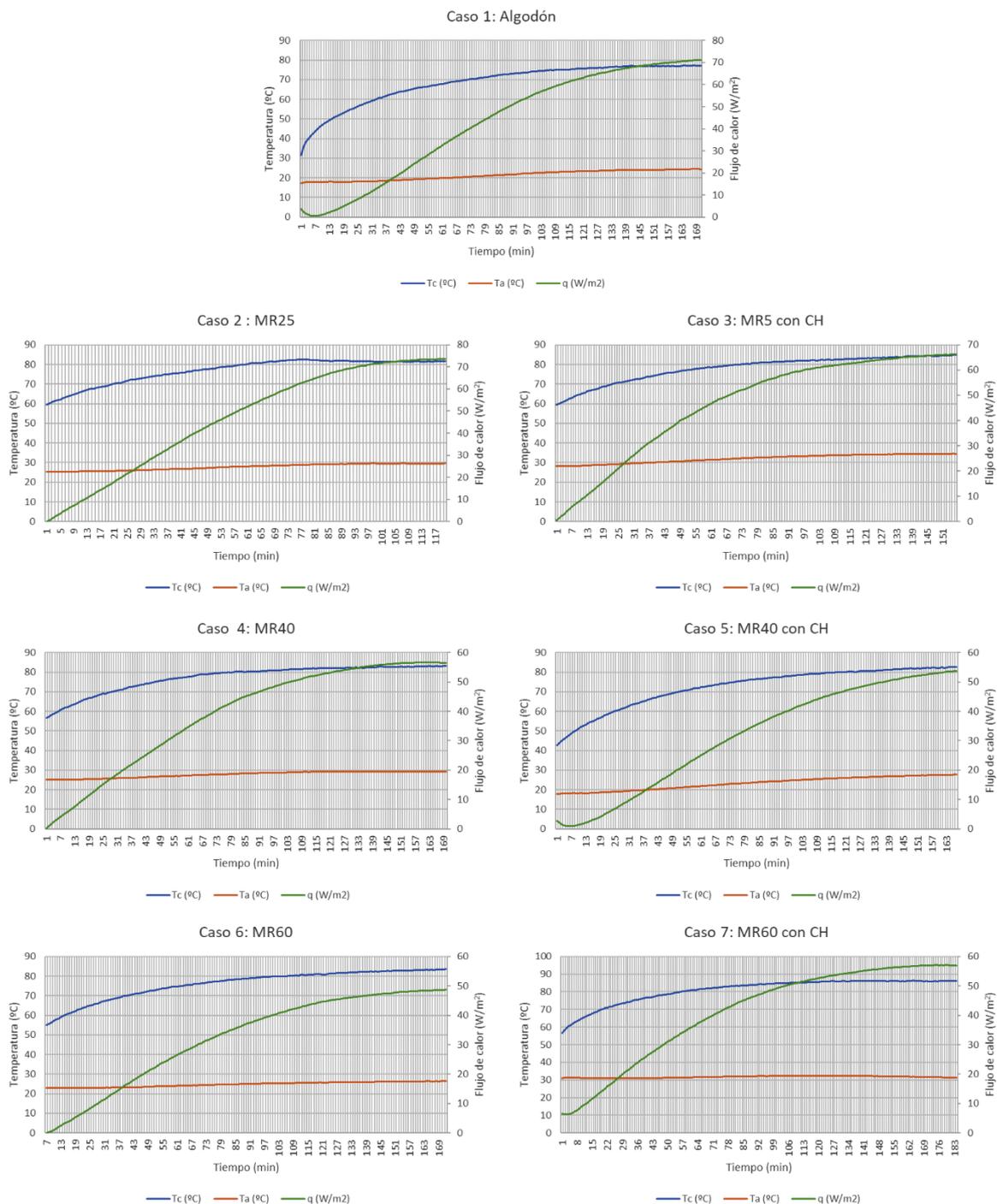


Figura 6.1 - Flujo de calor registrado en la superficie de la cámara ambiente y las temperaturas de la cámara caliente y cámara ambiente de cada caso (Elaboración propia)

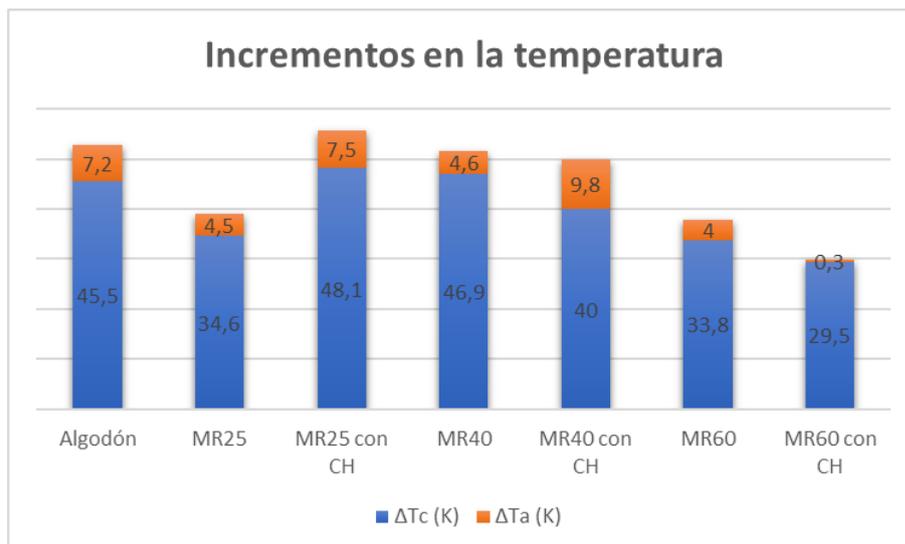


Figura 6.2 - Incremento de temperatura en los dos lados de la cámara de ensayo (Elaboración propia)

Casos	$\Delta T$ (K)	$\epsilon_{r,\Delta T}$	$q$ (W/m <sup>2</sup> )	$\epsilon_{r,q}$
1	52,80	0,13	69,00	1,61
2	51,90	0,14	72,70	0,73
3	49,30	0,57	63,70	1,87
4	53,20	0,40	54,60	2,02
5	54,50	0,31	51,00	1,94
6	56,20	0,61	46,80	1,46
7	53,80	0,56	54,80	2,11

Tabla 6.1 - Valores medios de la variación de la temperatura y del flujo de calor de los casos ensayados (Elaboración propia)

El flujo de calor fluctúa en función de la variación de la diferencia de temperatura que existe en los dos lados de la cámara de ensayo. La resistencia y la transmitancia térmica de cada ensayo se han calculado utilizando el método del promedio, tal y como se detalla en la sección 5.3 y sección 5.4.

Aunque el método para determinar las propiedades térmicas de las soluciones constructivas propuestas no está normalizado, se considera aceptable los resultados obtenidos ya que los ensayos fueron realizados mediante la misma metodología.

En general, los resultados obtenidos de los materiales reciclados muestran un rendimiento térmico satisfactorio. Las resistencias térmicas obtenidas de las mascarillas recicladas con una densidad igual o superior a  $40 \text{ kg/m}^3$  ( $R = 0,97 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ) muestran una mayor resistencia térmica en comparación con el algodón ( $R = 0,77 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ). Además, como era de esperar, cuanto mayor es la densidad de los materiales reciclados que se introducen en los prototipos, mayor es su resistencia térmica, como puede verse en la Figura 6.3.

En cuanto a los cartones de huevos, todos los resultados, a parte del último caso evaluado, indican que sus configuraciones con las mascarillas recicladas muestran una mejora de entre el 8 y el 10% en las propiedades térmicas de las soluciones inicialmente propuestas. Además, se puede ver como el caso 3 ( $R = 0,77 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ), compuesta por  $25 \text{ kg/m}^3$  de mascarillas recicladas, ya presenta un mejor resultado que el caso 1 con el aislamiento de algodón.

Con respecto al caso 7, el valor obtenido en esta configuración resultó ser menor de lo que se esperaba dado que la resistencia obtenida en este es inferior a la configuración del caso 6 tal como se puede ver en la Figura 6.3. Esto se debe a la posibilidad de un mal empaquetamiento de los materiales dentro del prototipo ya que, al acabar el ensayo, la muestra resultó haberse expandido debido a las altas temperaturas a las que había sido expuesta. Esto provocó que los cartones de huevos y las fibras de las mascarillas higiénicas se separaran permitiendo así, que el calor fluyera a través de ellos fácilmente. Por lo tanto, los resultados obtenidos del experimento se consideran no viables.

La Tabla 6.2 y Tabla 6.3, muestran la resistencia y la transmitancia térmica de los casos estudiados con sus respectivos errores. Para todos los casos ensayados, se observa que los errores varían entre  $\pm 1\%$  a  $\pm 3\%$ .

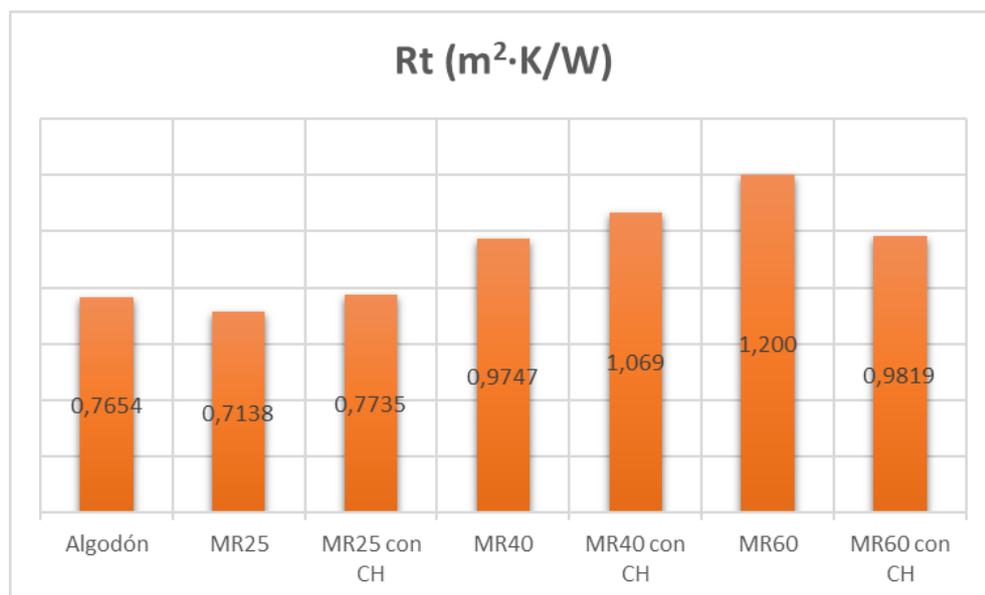


Figura 6.3 – Representación gráfica de los resultados de la resistencia térmica (Elaboración propia)

	Algodón	MR25	MR25 con CH	MR40	MR40 con CH	MR60	MR60 con CH
$\Sigma \Delta T$ (K)	2163,9	1193,7	2958,6	3566,4	2507,6	3205,3	4307,3
$\Sigma q$ (W/m²)	2827,0	1672,3	3824,8	3659,0	2346,1	2670,2	4386,8
$R_t$ (m²·K/W)	0,77	0,71	0,77	0,97	1,07	1,20	0,98
$R_{err,R}$	0,02	0,01	0,01	0,03	0,03	0,02	0,03

Tabla 6.2 - Valores calculados de la resistencia térmica a partir de las pruebas realizados (Elaboración propia)

A partir de los valores obtenidos de los ensayos, se realizó un cálculo siguiendo la (Ec. 5.2 y la (Ec. 5.4 para obtener la transmitancia térmica y la incertidumbre de uno de los casos estudiados. Como se puede observar en la Tabla 6.3, al ser el recíproco de la resistencia térmica, los valores de los aislantes están directamente relacionados con ella y, por tanto, la transmitancia térmica de los casos ensayados se reduce a medida que aumenta el valor de su resistencia térmica.

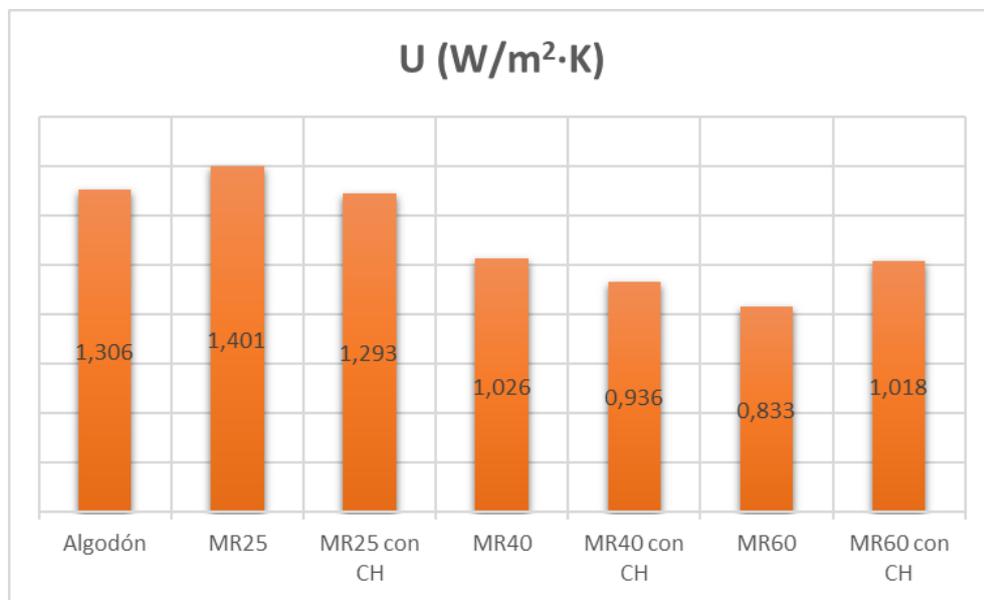


Figura 6.4 - Representación gráfica de los resultados de la transmitancia térmica (Elaboración propia)

	Algodón	MR25	MR25 con CH	MR40	MR40 con CH	MR60	MR60 con CH
$\Sigma \Delta T$ (K)	2163,9	1193,7	2958,6	3566,4	2507,6	3205,3	4307,3
$\Sigma q$ (W/m²)	2827,0	1672,3	3824,8	3659,0	2346,1	2670,2	4386,8
<b>U (W/m²·K)</b>	1,31	1,40	1,29	1,03	0,94	0,83	1,02
<b>R<sub>err,U</sub></b>	0,03	0,01	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03

Tabla 6.3 - Valores calculados de la transmitancia térmica a partir de las pruebas realizadas (Elaboración propia)

## 7. Análisis del impacto ambiental

A continuación, se realiza un estudio sobre el impacto que ha tenido la elaboración del presente trabajo en el ambiente.

Para la elaboración del trabajo se utilizó un ordenador portátil. Éste se utilizó no sólo para la redacción de la memoria del trabajo, y el procesamiento de los datos, sino también para la grabación de estos ya que, durante el proceso de la experimentación, el registrador del flujo de calor debe estar conectado a él en todo momento. Estimando un total de 5 h diarias dedicadas a la redacción de la memoria y al posterior procesamiento de los datos y 3 h para la duración de cada ensayo, se calcula que el total de horas dedicadas al uso del dispositivo es de unas 471 h. Además, también se ha utilizado un monitor LED de 24 pulgadas con un consumo de energía en modo encendido de 24 W para la redacción y tratamiento de los datos.

También, como se ha comentado en los apartados anteriores, antes de poder realizar cualquier tipo de ensayo experimental, había que realizar tratamientos previos en la cámara de ensayos facilitada por la Asociación de Oasiurbà. Para ello, se ha dedicado un tiempo determinado a la adquisición de los elementos necesarios para su tratamiento. La distancia total recorrida para la adquisición de estos materiales se calcula que es de aproximadamente 22,5 km. Además, para la fabricación de dichos prototipos se ha utilizado una sierra eléctrica de 500 W.

Por último, dado que las fuentes de calor de la cámara sólo están encendidas durante la duración de cada experimento, se estima que las horas de funcionamiento de las fuentes de calor es de 21 h.

	<b>Tiempo de uso (h)</b>	<b>Distancia recorrida (km)</b>	<b>Potencia (kW)</b>	<b>Consumo (kWh)</b>
<b>Portátil</b>	471	-	0,05	23,55
<b>Monitor</b>	300	-	0,024	7,2
<b>Fuente de calor</b>	21	-	0,4	8,4
<b>Herramientas</b>	24	-	0,5	12
<b>Desplazamientos</b>	-	22,5	-	-

*Tabla 7.1 - Resumen del consumo energético de cada actividad (Elaboración propia)*

Para determinar la cantidad de CO<sub>2</sub> generado durante la elaboración del presente trabajo, La Oficina Catalana del Cambio Climático [34] estima que el factor de la red eléctrica peninsular en fecha de abril de 2022 es de 0,259 kg CO<sub>2</sub>/kWh.

En cuanto al cálculo de las emisiones generadas durante los desplazamientos realizados para la adquisición de los materiales, La Oficina Catalana del Cambio Climático ha publicado la versión 2022 de la Calculadora de emisiones de GEI. Esta herramienta permite estimar las emisiones asociadas a una actividad de forma automatizada a partir de los datos de actividad.

Mode de transport	Trajecte	Distància total recorreguda (km) *1	Nº de passatgers	Factor d'emissió de CO <sub>2</sub> kg CO <sub>2</sub> eq/(passatger*km)	Emissions de CO <sub>2</sub>	
					tones CO <sub>2</sub> eq	Font dades factor emissió CO <sub>2</sub>
METRO	Passeig de Gràcia	22,50	1,00	0,04	0,00085	OCCC
	Indiqueu origen i destí				0,00000	OCCC
	Indiqueu origen i destí				0,00000	OCCC

Figura 7.1 - Interfaz de la calculadora de las emisiones de CO<sub>2</sub> [35]

	Emisión (kg CO <sub>2</sub> )
Portátil	6,10
Monitor	1,86
Fuente de calor	2,18
Herramientas	3,11
Desplazamiento	0,85
<b>TOTAL</b>	<b>14,10</b>

Tabla 7.2 - Emisiones de CO<sub>2</sub> generados en el trabajo (Elaboración propia)

## 8. Conclusiones

En este trabajo, las propiedades térmicas experimentales de los materiales reciclados como las mascarillas quirúrgicas y el algodón reciclado se han obtenido mediante un dispositivo de medición de resistencia y transmitancia térmica que se ha desarrollado siguiendo un método estandarizado (Método de la Caja Caliente) como referencia. El sistema permitió la existencia del gradiente de temperatura entre los dos lados de la cámara de ensayo y, además, mantuvo las temperaturas en estado estable durante un periodo de tiempo determinado tal como se muestra en la Figura 6.1. Por otra parte, la instrumentación utilizada ha permitido obtener datos de alta precisión y, en consecuencia, disponer menores incertidumbres, entre  $\pm 1\%$  y  $\pm 3\%$ , en los resultados finales.

Para los materiales seleccionados y el rango de densidades de las mascarillas recicladas, de 25 a 60  $\text{kg/m}^3$ , la resistencia y transmitancia térmica resultó proporcional a la densidad y con valores de entre 0,71 - 1,20  $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$  y 1,40 - 0,83  $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$  respectivamente. Los mejores resultados de resistencia térmica se han obtenido en las configuraciones del caso 5 y 6, con valores de 1,07 y 1,20  $\text{m}^2 \text{K/W}$ , siendo estos más elevados que el caso del algodón (0,77  $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$ ) que es un material aislante que ya se encuentra disponible en el mercado. Los prototipos con las configuraciones de mascarillas recicladas y cartones de huevos presentaron mejores prestaciones térmicas comparado con las configuraciones sin los cartones de huevos.

Según los resultados obtenidos de los experimentos realizados, el caso 6 presenta mejores prestaciones térmicas con una resistencia total obtenida de  $R_t = 1,20 \pm 0,02 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ . Esta configuración está compuesta por 60  $\text{kg/m}^3$  de mascarillas recicladas. Por otro lado, la configuración del caso 5 con  $R_t = 1,07 \pm 0,02 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  compuesta por 40  $\text{kg/m}^3$  de mascarillas recicladas y cartones de huevos, ensamblados tal como se muestra en la Ilustración 4.17, presenta resultados muy cercanos a los del caso 6 y podría considerarse una buena alternativa, especialmente si además de los problemas de confort térmico también es importante reducir las molestias acústicas de los habitantes. Este último es debido a que los cartones de huevos son buenos aislamientos acústicos según [38] [39] [31].

Pese al correcto funcionamiento del dispositivo, en algunos casos se produce un cambio en los datos registrados de las temperaturas y del flujo de calor. Estas fluctuaciones pueden ser causada por la pérdida de funcionalidad de las fuentes de energía debido al elevado uso de estas. Aun así, debido a que dichas fluctuaciones se encontraron dentro del rango de  $\pm 0,2 \text{ W/m}^2$  establecido, se consideran viables los resultados finales de los ensayos realizados.

Por último, se concluye que las soluciones propuestas por la Asociación Oasiurbà y los materiales aislantes utilizados en esta investigación podrían aumentar considerablemente la eficiencia energética de las viviendas en las que serán instalados. Además, el uso de materiales reciclados como materiales de aislamiento alternativos también permitiría reducir las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por las mascarillas higiénicas y los cartones de huevos.

## 9. Análisis económico

Para poder llevar a cabo el proyecto, es necesario realizar una inversión inicial de unos **7.199,58€** para realizar los procesos de fabricación y las mediciones presentadas en los puntos anteriores. En la Tabla 9.1 se puede ver de forma más detallada el motivo de esta inversión.

En cuanto a los costes de la mano de obra, se ha estimado que su coste por hora es de 8€/h que es el precio mínimo que estipula l'Escola d'Enginyeria de Barcelona Est -UPC tanto para las prácticas curriculares como para las prácticas extracurriculares.

Teniendo en cuenta que la proyecto empezó el 17 de septiembre del 2021 y llegó a su fin el 30 de abril del 2022 y estimando un total de horas trabajadas semanalmente de aproximadamente 25h/semana, se calcula que las horas dedicadas en el presente trabajo es de unos 700h.

Por último, dado que el material aislante de algodón no puede comprarse con las medidas del prototipo utilizado, éstas se compraron con las dimensiones indicadas por el comerciante 0,6 x 1,25 m<sup>2</sup> (ancho x alto). Además, estos se venden en packs de 12 unidades de planchas de algodón.

A continuación, se puede ver los costes totales, los precios de cada elemento utilizado y el listado de los materiales que se han utilizado para la elaboración del presente trabajo.

Salario	Precio (€/h)	Horas	Total (€)
Salario neto por horas	8	700	5.600,00 €
<b>Sensores</b>			
Precio (€)	Unidades	Total	
Registrador de datos de temperatura	324,62 €	1	324,62 €
Termopar tipo k	26,99 €	2	53,98 €
Registrador de datos de flujo de calor	583,00 €	1	583,00 €
Sensor de flujo de calor	373,00 €	1	373,00 €
<b>Material</b>			
Precio (€)	Unidades	Total (€)	
Rollos de corcho	22,99 €	5	114,95 €
Planchas de poliestireno expandido	4,45 €	2	8,90 €
Bolsas de plástico	3,43 €	2	6,86 €
Lámparas incandescentes	2,72 €	2	5,44 €
Porta bombillas	3,00 €	2	6,00 €
Cable eléctrico de 5m	7,99 €	1	7,99 €
Liston de 4x4x300 cm <sup>3</sup>	6,35 €	1	14,99 €
Pack de 12 planchas de algodón	49,59 €	1	49,59 €
Panel de DM10 244x60 cm <sup>2</sup>	25,75 €	1	25,75 €
Cinta adhesiva de papel	2,50 €	1	2,50 €
Pilas de AAA	2,60 €	1	2,60 €
<b>Software</b>			
Precio (€)	Meses	Total (€)	
SolidWorks	Versión de prueba		
Programa del sensor de flujo de calor	Incluido en el precio del sensor		
Microsoft office 365 Personal	69,00 €	Indefinido	69,00 €
<b>Total</b>			<b>7.249,17 €</b>

Tabla 9.1 - Análisis de costes del proyecto (Elaboración propia)

## 10. Bibliografía

1. *Actualización de indicadores de la Estrategia Nacional contra la Pobreza Energética.* (s/f). Gob.es. Recuperado el 17 de abril de 2022, de [https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/estrategia-pobreza-energetica/actualizacionindicadorespobrezaenergetica2021\\_tcm30-534743.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/estrategia-pobreza-energetica/actualizacionindicadorespobrezaenergetica2021_tcm30-534743.pdf)
2. Anglian Team Blog. (2014, Julio 30). *Understanding Conduction and Convection is essential for improving your home's efficiency.* Good to Be Home. <https://www.anglianhome.co.uk/goodtobehome/home-news/understanding-conduction-convection-essential-improving-homes-efficiency/>
3. *BOE.es - BOE-A-2020-3824 Real Decreto-ley 8/2020, de 17 de marzo, de medidas urgentes extraordinarias para hacer frente al impacto económico y social del COVID-19.* (s/f). Boe.es. Recuperado el 17 de abril de 2022, de <https://www.boe.es/eli/es/rdl/2020/03/17/8>
4. *BOE.es - BOE-A-2020-4208 Real Decreto-ley 11/2020, de 31 de marzo, por el que se adoptan medidas urgentes complementarias en el ámbito social y económico para hacer frente al COVID-19.* (s/f). Boe.es. Recuperado el 17 de abril de 2022, de <https://www.boe.es/eli/es/rdl/2020/03/31/11/con>
5. Bouzarovski, S., & Petrova, S. (2015). A global perspective on domestic energy deprivation: Overcoming the energy poverty–fuel poverty binary. *Energy Research & Social Science*, 10, 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.06.007>
6. *Calificación energética de edificios.* (s/f). Idae.es. Recuperado el 16 de abril de 2022, de <https://www.idae.es/tecnologias/eficiencia-energetica/edificacion/calificacion-energetica-de-edificios>
7. *Característiques de la població.* (s/f). Barcelona.cat. Recuperado el 17 de abril de 2022, de [https://ajuntament.barcelona.cat/estadistica/catala/Estadistiques\\_per\\_temes/Poblacio\\_i\\_demografia/Documents\\_relacionats/lecpadro/a2020/index.htm](https://ajuntament.barcelona.cat/estadistica/catala/Estadistiques_per_temes/Poblacio_i_demografia/Documents_relacionats/lecpadro/a2020/index.htm)
8. *Comisión Europea -Department: Energia -En el punto de mira La eficiencia energética de los edificios.* (s/f). Europa.eu. Recuperado el 16 de abril de 2022, de [https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/energy\\_climate\\_change\\_environment/events/documents/in\\_focus\\_energy\\_efficiency\\_in\\_buildings\\_es.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/energy_climate_change_environment/events/documents/in_focus_energy_efficiency_in_buildings_es.pdf)
9. *Consumo por usos residencial.* (s/f). Idae.Es. Recuperado el 16 de abril de 2022, de <https://informesweb.idae.es/consumo-usos-residencial/index.php>
10. Cooper, D. (s/f). *Energy efficiency for buildings.* Euenergycentre.org. Recuperado el 17 de abril de 2022, de <https://www.euenergycentre.org/images/unep%20info%20sheet%20-%20ee%20buildings.pdf>
11. *DBHE Sección HE1. Condiciones para el control de la demanda energética.* (s/f). Codigotecnico.org. Recuperado el 16 de abril de 2022, de [https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DA\\_DB-HE-1\\_Calculo\\_de\\_parametros\\_caracteristicos\\_de\\_la\\_envolvente.pdf](https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DA_DB-HE-1_Calculo_de_parametros_caracteristicos_de_la_envolvente.pdf)

12. Oficina Municipal de Dades, D. D. i. D., de Dades, O. M., & Municipal, G. (2021). *La població de Barcelona: lectura del Padró municipal d'habitants a 01-01-2021: síntesi de resultats*. <https://bcnroc.ajuntament.barcelona.cat/jspui/handle/11703/123040>
13. *El parque de viviendas en España envejece: una de cada dos casas tiene más de 40 años*. (s/f). idealista/news. Recuperado el 17 de abril de 2022, de <https://www.idealista.com/news/inmobiliario/vivienda/2021/09/21/792446-el-parque-de-viviendas-envejece-una-de-cada-dos-casas-tiene-mas-de-40-anos>
14. *El Raval de Barcelona / Punto de análisis del entorno social / BRAVAL*. (s/f). Braval.Org. Recuperado el 17 de abril de 2022, de [https://www.braval.org/es/p/punto\\_de\\_analisis\\_del\\_entorno\\_social/el\\_raval\\_de\\_barcelona](https://www.braval.org/es/p/punto_de_analisis_del_entorno_social/el_raval_de_barcelona)
15. *Energy poverty*. (s/f). Energy. Recuperado el 17 de abril de 2022, de [https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/energy-consumer-rights/energy-poverty\\_es](https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/energy-consumer-rights/energy-poverty_es)
16. Francesco Asdrubali, Francesco D'Alessandro, Giorgio Baldinelli, Francesco Bianchi. (s/f). *Evaluating in situ thermal transmittance of green buildings masonries—A case study, Case Studies in Construction Materials*. Sciencedirect.com. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2014.04.004>.
17. *GBCe*. (s/f). Gbce.es. Recuperado el 16 de abril de 2022, de <https://gbce.es/blog/2022/03/07/espana-necesita-multiplicar-por-cinco-su-ritmo-anual-de-rehabilitacion-de-viviendas-para-cumplir-su-compromiso-de-cero-emisiones-en-2050/>
18. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja – IETcc-CSIC y de la Asociación de Investigación y Cooperación Industrial de Andalucía, AICIA. (s/f). *Calificación de la eficiencia energética de los edificios*. Gob.es. Recuperado el 16 de abril de 2022, de <https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/DocumentosReconocidos/normativamodelosutilizacion/20151123-Calificacion-eficiencia-energetica-edificios.pdf>
19. Martí, S., & Raval, E. (s/f). *Oficina Municipal de Dades*. Barcelona.cat. Recuperado el 17 de abril de 2022, de [https://bcnroc.ajuntament.barcelona.cat/jspui/bitstream/11703/122668/1/Obs\\_barris\\_2021A.pdf](https://bcnroc.ajuntament.barcelona.cat/jspui/bitstream/11703/122668/1/Obs_barris_2021A.pdf)
20. *Médicos del Mundo alerta del drama sanitario que provoca la pobreza energética*. (2021, diciembre 15). Médicos del Mundo. <https://www.medicosdelmundo.org/actualidad-y-publicaciones/noticias/medicos-del-mundo-alerta-del-drama-sanitario-que-provoca-la>
21. *Residencial, comercial e institucional*. (s/f). Gob.es. Recuperado el 16 de abril de 2022, de <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/edificacion.aspx>
22. Tirado Herrero, S., & Europe, R. (s/f). *Indicadors municipals de pobresa energètica a la ciutat de Barcelona*. Habitatge.barcelona. Recuperado el 16 de abril de 2022, de <https://www.habitatge.barcelona/sites/default/files/documents/indicadors-municipals-de-pobresa-energetica-a-la-ciutat-de-barcelona.pdf>
23. World Bank Group. (2021, junio 18). *El acceso universal a la energía sostenible seguirá siendo inalcanzable, a menos que se aborden las desigualdades*. World Bank Group.

- <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2021/06/07/report-universal-access-to-sustainable-energy-will-remain-elusive-without-addressing-inequalities>
24. Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones (4a. ed.--.). México D.F.: McGraw Hill.
  25. Oficina Municipal de Dades, O. M., & Municipal, G. (2021). Observatori barris. 2021: dades actualitzades 2014-2020. <https://bcnroc.ajuntament.barcelona.cat/jspui/handle/11703/122668>
  26. El barrio actual del Raval. (2018, April 9). Ciutat Vella. <https://ajuntament.barcelona.cat/ciutatvella/es/el-distrito-y-sus-barrios/el-raval/barrio-actual>
  27. Wikipedia contributors. (n.d.). Rehabilitación de viviendas. Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Rehabilitaci%C3%B3n\\_de\\_viviendas&oldid=139906181](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Rehabilitaci%C3%B3n_de_viviendas&oldid=139906181)
  28. Asdrubali, F.; D'Alessandro, F.; Baldinelli, G.; Bianchi, F. Evaluating in situ thermal transmittance of green buildings masonries—A case study. *Case Stud. Constr. Mater.* 2014, 1, 53–59
  29. Environment, U. N. (2017, September 26). Sustainable buildings. UNEP - UN Environment Programme. <https://www.unep.org/explore-topics/resource-efficiency/what-we-do/cities/sustainable-buildings>
  30. Lu, X., & Memari, A. M. (2018). Comparative study of Hot Box Test Method using laboratory evaluation of thermal properties of a given building envelope system type. *Energy and Buildings*, 178, 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.044>
  31. Neri, M., Pilotelli, M., Traversi, M., Levi, E., Piana, E. A., Bannó, M., Cuerva, E., Pujadas, P., & Guardo, A. (2021). Conversion of end-of-Life Household Materials into building insulating low-cost solutions for the development of vulnerable contexts: Review and outlook towards a circular and sustainable economy. *Sustainability*, 13(8), 4397. <https://doi.org/10.3390/su13084397>
  32. Estudio Ree\_Habilitant. (2020, October 28). Oasiurba. <https://oasiurba.org/project/estudio-ree-habilitant/>
  33. Datos climáticos mundiales - Climate-Data.org. (n.d.). Climate-data.org. Retrieved April 27, 2022, from <https://es.climate-data.org>
  34. Oficina Catalana del Cambio Climático, O. C. (n.d.). Factor de emisión de la energía eléctrica: el mix eléctrico. Cambio climático. Retrieved April 27, 2022, from [https://canviclimatic.gencat.cat/es/actua/factors\\_demissio\\_associats\\_a\\_lenergia/](https://canviclimatic.gencat.cat/es/actua/factors_demissio_associats_a_lenergia/)
  35. Oficina Catalana del Cambio Climático, O. C. (n.d.-a). Calculadora de emisiones de GEI. Cambio climático. Retrieved April 27, 2022, from [https://canviclimatic.gencat.cat/es/actua/calculadora\\_demissions/index.html](https://canviclimatic.gencat.cat/es/actua/calculadora_demissions/index.html)
  36. Energía, A. y. (2015, marzo 10). La transmisión del calor en edificios. *Arquitectura y Energía*. <http://www.arquitecturayenergia.cl/home/la-transmision-del-calor/>

37. Informe anual de consumos por usos del sector residencial(s/f) Idae.es. Recuperado el 1 de mayo de 2022, de <https://www.idae.es/informacion-y-publicaciones/estudios-informes-y-estadisticas>
38. Neri, M., Levi, E., Cuerva, E., Pardo-Bosch, F., Zabaleta, A. G., & Pujadas, P. (2021). Sound absorbing and insulating low-cost panels from end-of-life household materials for the development of vulnerable contexts in circular economy perspective. Applied Sciences (Basel, Switzerland), 11(12), 5372. <https://doi.org/10.3390/app11125372>
39. Neri, M., Levi, E., Piana, E. A., Pujadas, P., Cuerva, E., Guardo, A., & Pilotelli, M. (2021). Sustainable and low-cost solutions for thermal and acoustic refurbishment of old buildings. Journal of physics. Conference series, 1868(1), 012027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1868/1/012027>

# 11. Anexos

## Anexo A. Certificado de calibración del sensor de flujo de calor

En el siguiente apartado se presenta el certificado de calibración del flujo de calor utilizado en todos los ensayos realizados.

Page 1 of 4  
LI-16111084-20210824

### Certificate of calibration

Certificate number: LI-16111084-20210824

Manufacturer: Leiderdorp Instruments  
 Location of calibration: Achthovenweg 19, The Netherlands

Model: LI-19

Serial number: 16111084

Date of calibration: 2021-08-24

Temperature (°C): 23±0.5°C

Humidity (% RH): 60±30%

Performed by (calibration technician): Peter Chung

Signature: 

Page 4 of 4  
LI-16111084-20210824

### Certificate of calibration

Certificate number: LI-16111084-20210824

AFTER ADJUSTMENT					
Range	Calibration results			offset measurement	
	Zero scale input voltage	Nominal zero-scale counts	Measured zero-scale counts	PASS (P)	FAIL (F)
x 1	0.000 mV	0	1	P	
x 2	0.000 mV	0	0	P	
x 4	0.000 mV	0	0	P	
x 8	0.000 mV	0	1	P	
x 16	0.000 mV	0	2	P	
x 32	0.000 mV	0	1	P	

AFTER ADJUSTMENT					
Range	Calibration results			full scale measurement	
	Full-scale input voltage	Nominal full-scale counts	Measured full-scale counts	Uncertainty counts	PASS (P)
x 1	194.9 mV	19493	19494	3	P
x 2	100.0 mV	9997	9997	2	P
x 4	49.99 mV	4999	4998	1	P
x 8	24.99 mV	24989	24988	10	P
x 16	12.49 mV	12495	12494	8	P
x 32	6.247 mV	6247	6246	4	P

Serial number: 16111084

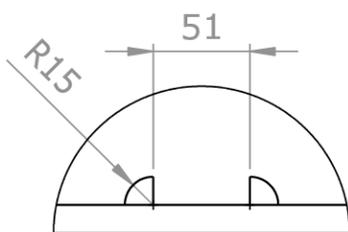
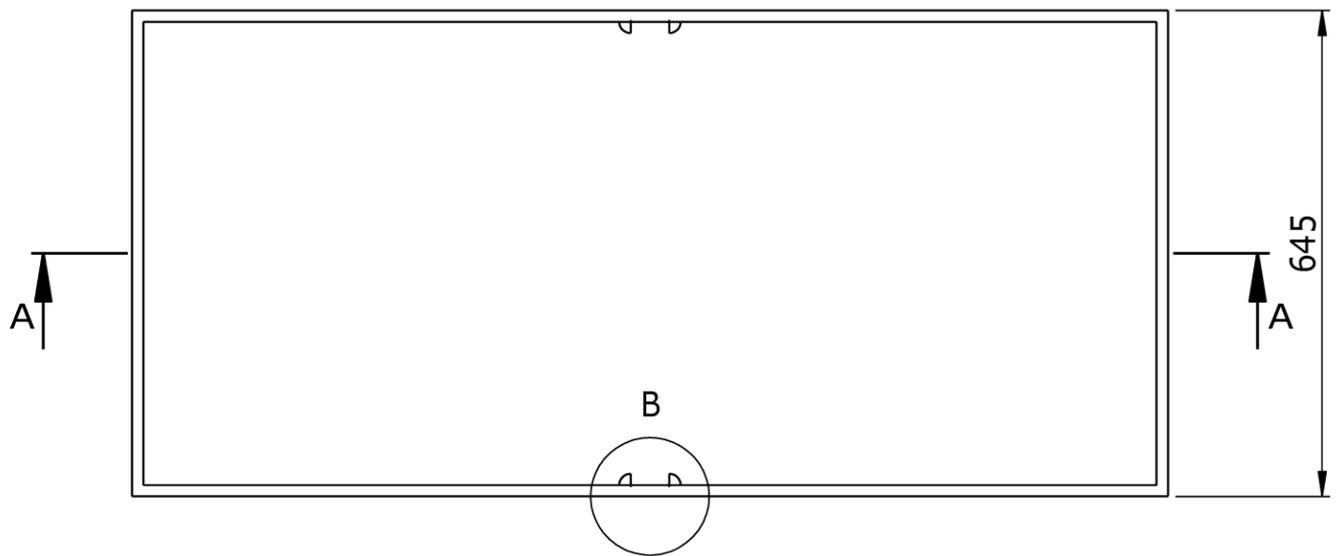
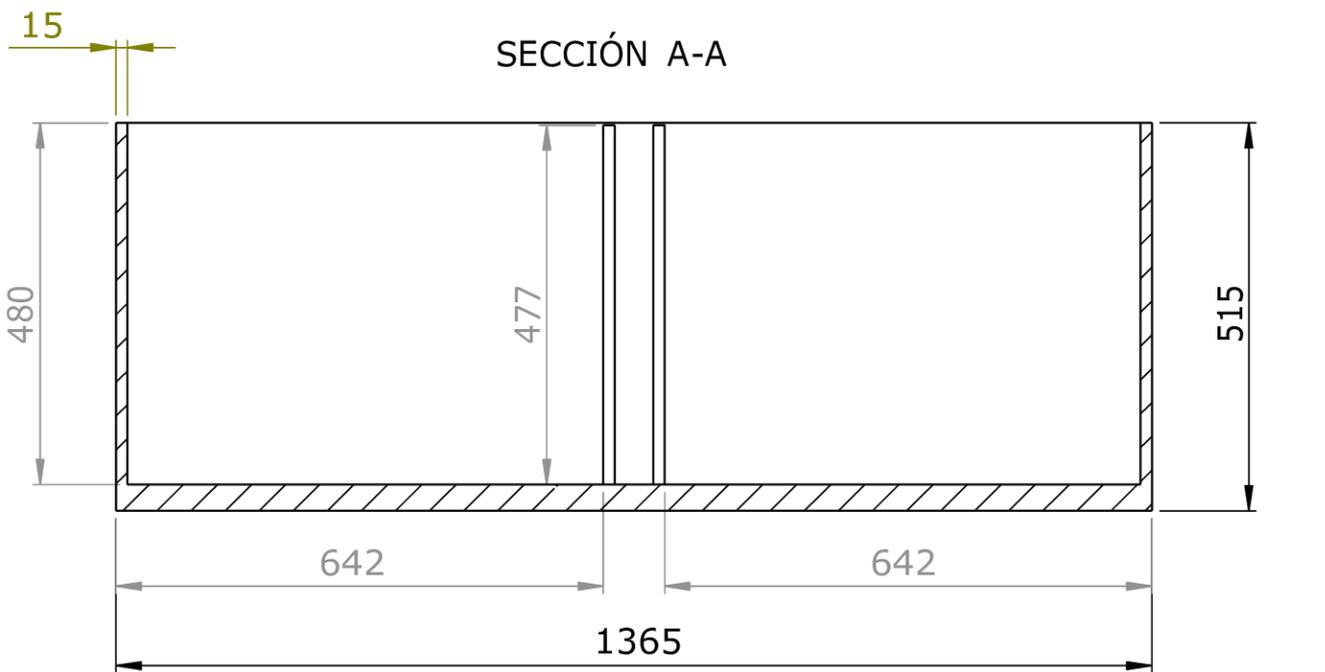
Date of calibration: 2021-08-24

Figura 11.1 - Certificado de calibración (Elaboración propia)

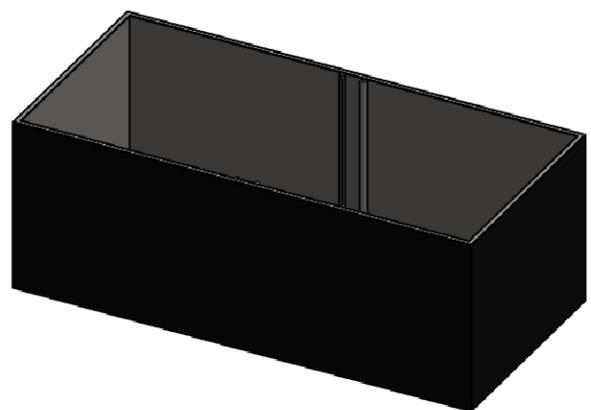
## **Anexo B. Planos de la caja de ensayo y de los paneles ensayados**

En este apartado se recogen todos los datos relacionados con la fabricación de los prototipos y los elementos necesarios para la puesta en marcha de la caja de ensayo. Cabe resaltar que las dimensiones están todos en mm como la normativa general indica.

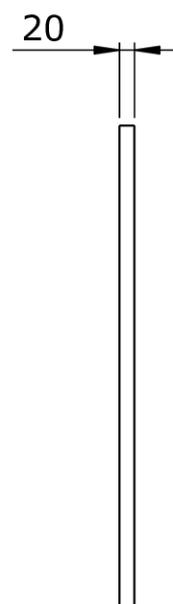
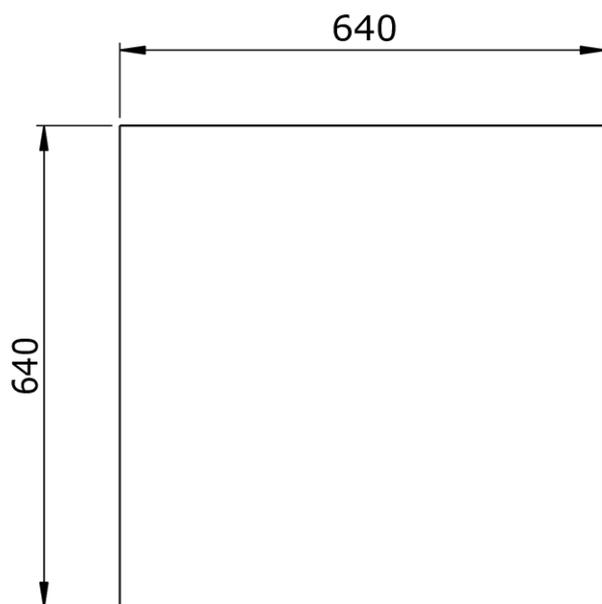




DETALLE B  
ESCALA 1 : 4



Título: Evaluación de soluciones de rehabilitación energética para viviendas vulnerables en el barrio del Raval	Pieza: Cámara de ensayo	Plano nº: 1
Comprobado: Alfredo Guardo Zabaleta	Fecha: 15/04/2022	Cantidad: 1
Dibujado: Dan Alexon Mendoza Hernandez	Formato: DIN A4	Escala: 1:10
 <b>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA</b> <b>BARCELONATECH</b> Escola d'Enginyeria de Barcelona Est		Proyección: 
		Material: Madera



Título: Evaluación de soluciones de rehabilitación energética para viviendas vulnerables en el barrio del Raval

Pieza:  
**Cubierta**

Plano nº:  
**2**

Comprobado:  
**Alfredo Guardo Zabaleta**

Fecha: **15/04/2022**

Cantidad: **2**

Dibujado:  
**Dan Alexon Mendoza Hernandez**

Formato:  
**DIN A4**

Escala:  
**1:10**

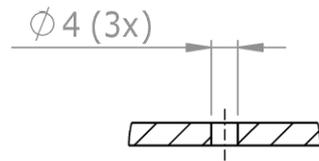
Proyección:



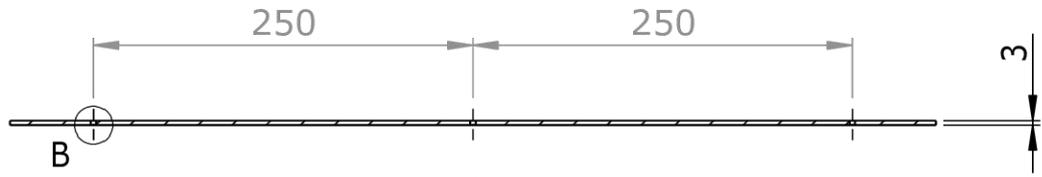
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

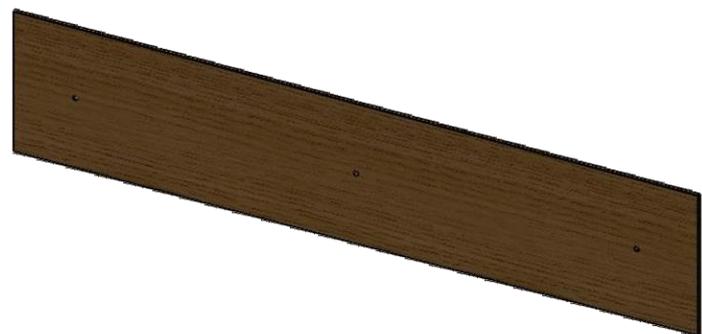
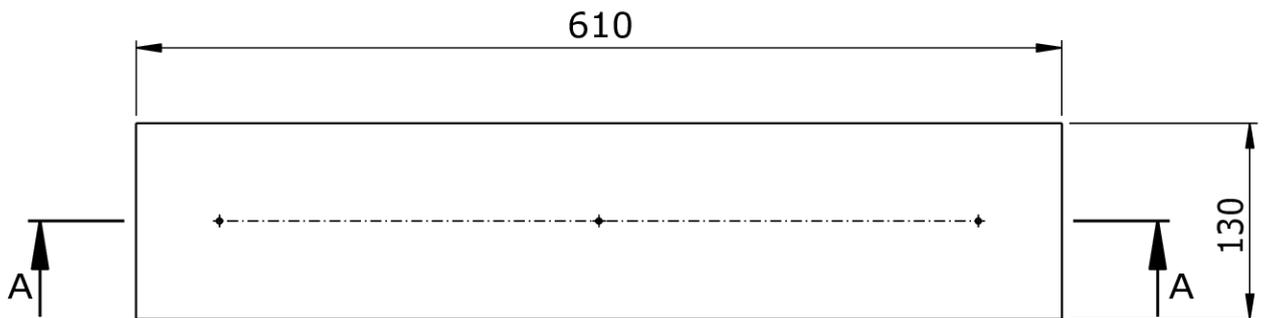
Material: **Madera**



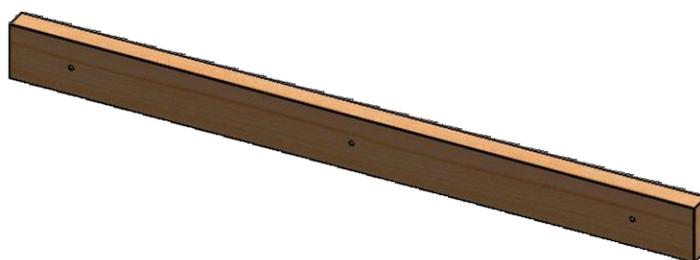
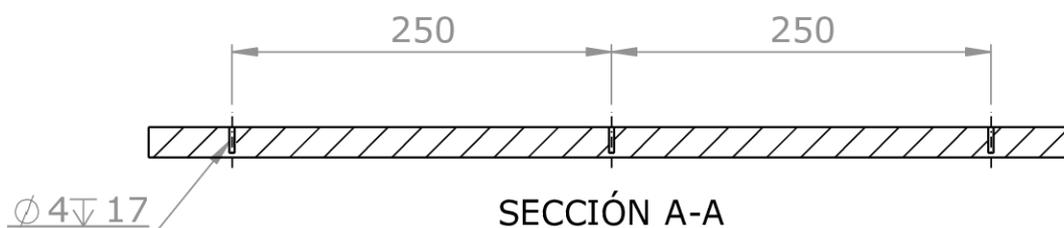
DETALLE B  
ESCALA 1 : 1



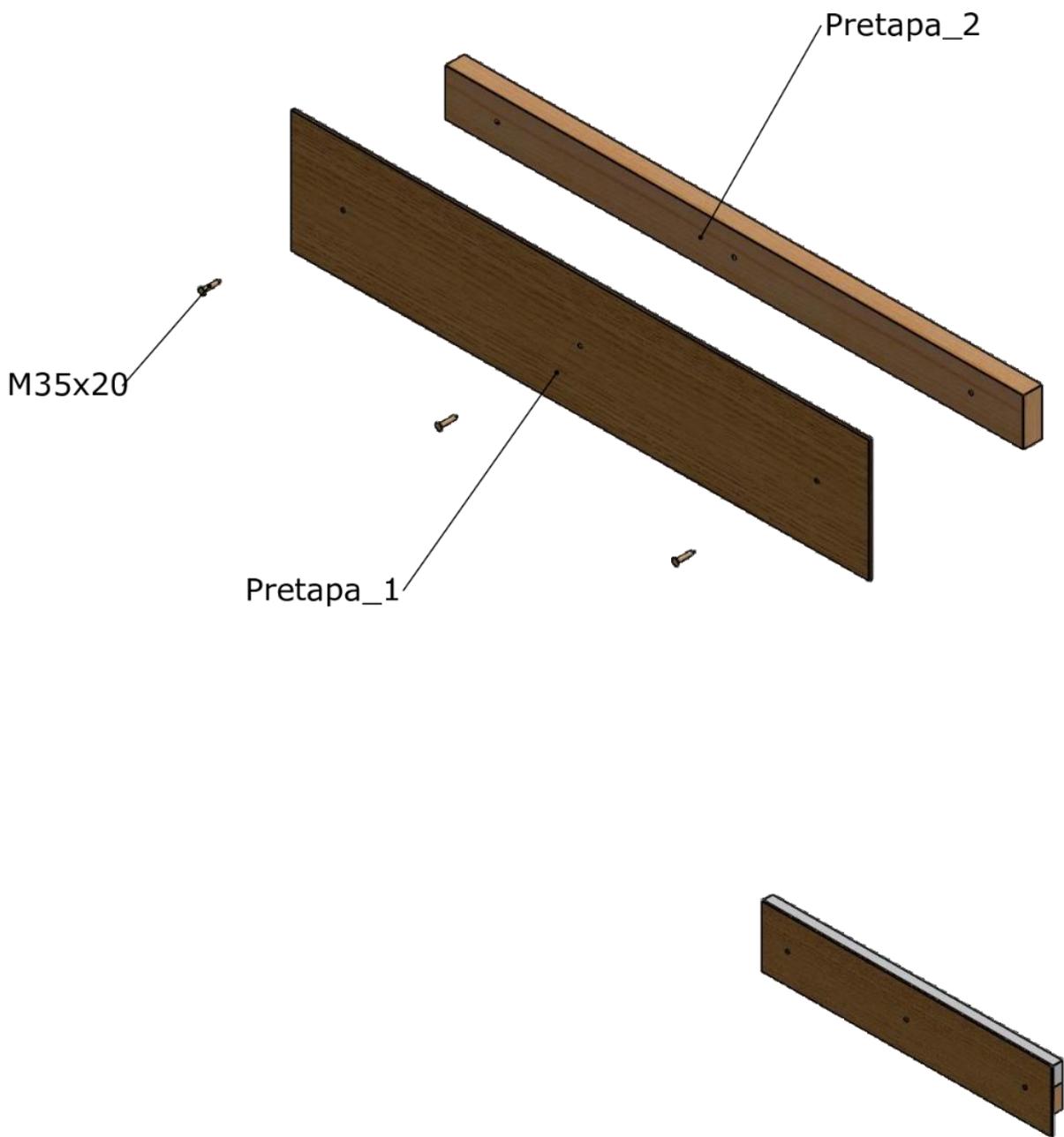
SECCIÓN A-A



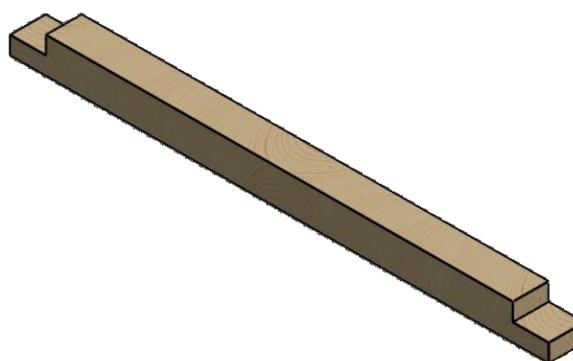
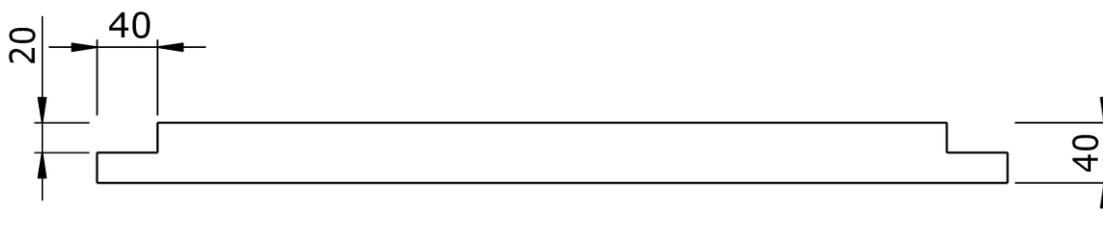
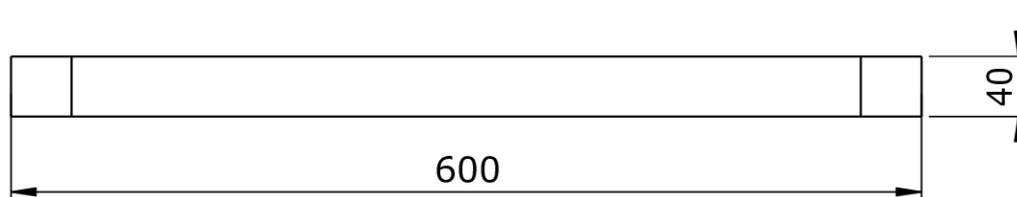
Título: Evaluación de soluciones de rehabilitación energética para viviendas vulnerables en el barrio del Raval	Pieza: Pretapa_1	Plano nº: 3
Comprobado: Alfredo Guardo Zabaleta	Fecha: 15/04/2022	Cantidad: 1
Dibujado: Dan Alexon Mendoza Hernandez	Formato: DIN A4	Escala: 1:5
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola d'Enginyeria de Barcelona Est		Proyección: 
	Material: DM3	

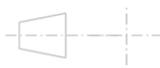


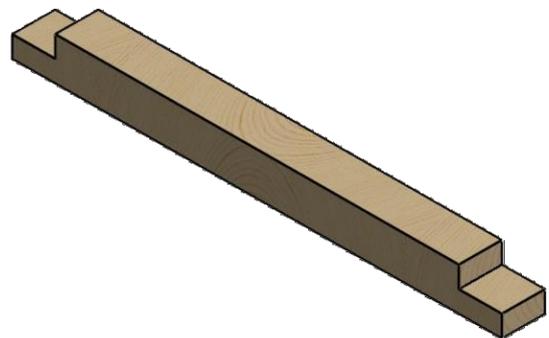
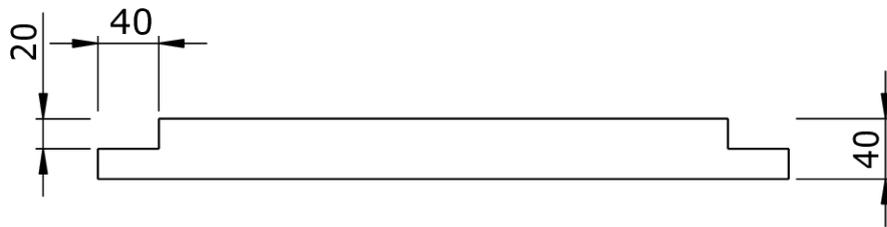
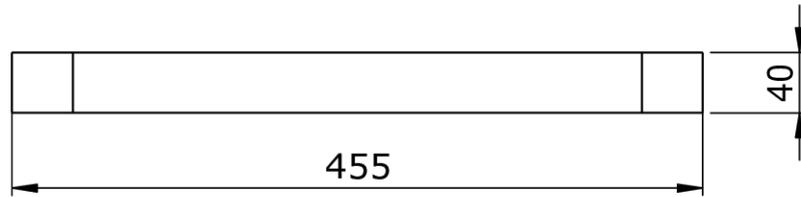
Título: Evaluación de soluciones de rehabilitación energética para viviendas vulnerables en el barrio del Raval	Pieza: Pretapa_2	Plano nº: 4
Comprobado: Alfredo Guardo Zabaleta	Fecha: 15/04/2022	Cantidad: 1
Dibujado: Dan Alexon Mendoza Hernandez	Formato: DIN A4	Escala: 1:5
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola d'Enginyeria de Barcelona Est		Proyección: 
	Material: Madera	



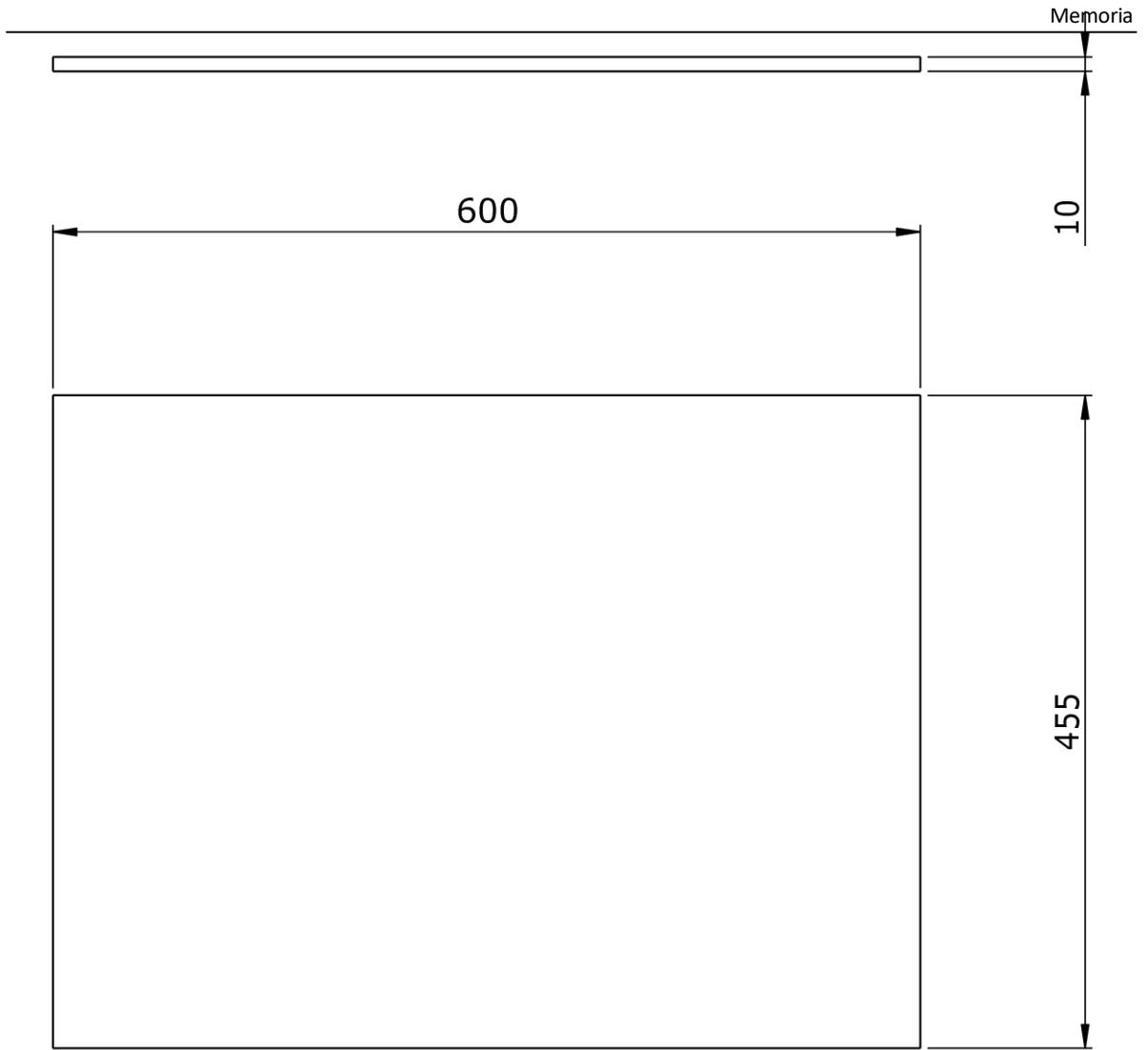
Título: Evaluación de soluciones de rehabilitación energética para viviendas vulnerables en el barrio del Raval		Pieza: Ensamblaje Pretapa	Plano nº: 5
Comprobado: Alfredo Guardo Zabaleta		Fecha: 15/04/2022	Cantidad: 1
Dibujado: Dan Alexon Mendoza Hernandez		Formato: DIN A4	Escala: 1:5
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola d'Enginyeria de Barcelona Est			
OLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.		Material: Madera	



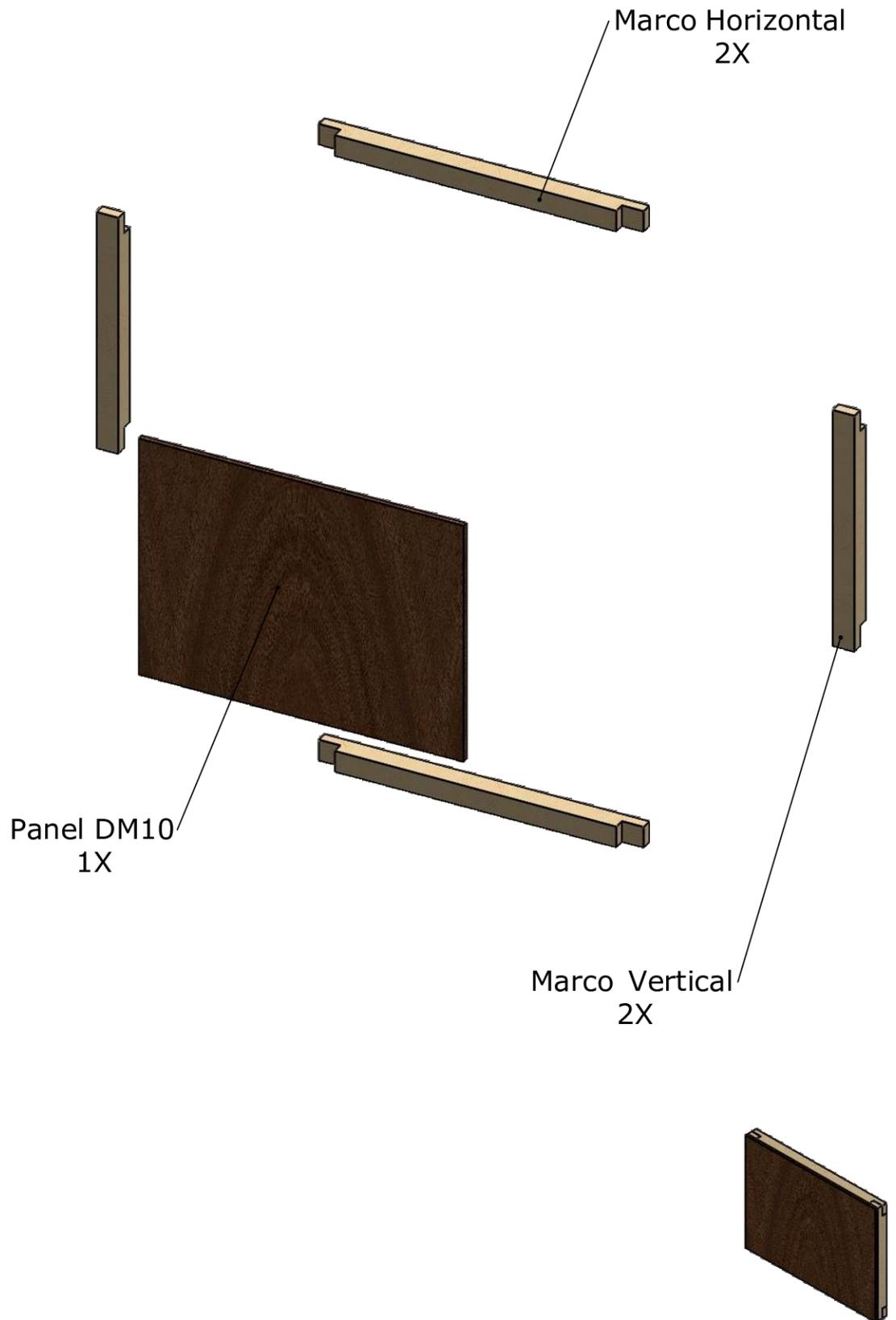
<p>Título: Evaluación de soluciones de rehabilitación energética para viviendas vulnerables en el barrio del Raval</p>	<p>Pieza: <b>Marco horizontal</b></p>	<p>Plano nº: <b>6</b></p>
<p>Comprobado: <b>Alfredo Guardo Zabaleta</b></p>	<p>Fecha: <b>15/04/2022</b></p>	<p>Cantidad: <b>2</b></p>
<p>Dibujado: <b>Dan Alexon Mendoza Hernandez</b></p>	<p>Formato: <b>DIN A4</b></p>	<p>Escala: <b>1:5</b></p>
<p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola d'Enginyeria de Barcelona Est</p>	<p>Material: <b>Madera</b></p>	<p>Proyección: </p>



Título: Evaluación de soluciones de rehabilitación energética para viviendas vulnerables en el barrio del Raval	Pieza: <b>Marco vertical</b>		Plano nº: <b>7</b>
Comprobado: <b>Alfredo Guardo Zabaleta</b>	Fecha: <b>15/04/2022</b>		Cantidad: <b>2</b>
Dibujado: <b>Dan Alexon Mendoza Hernandez</b>	Formato: <b>DIN A4</b>	Escala: <b>1:5</b>	Proyección: 
 <b>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA</b> <b>BARCELONATECH</b> Escola d'Enginyeria de Barcelona Est		Material: <b>Madera</b>	



Título: Evaluación de soluciones de rehabilitación energética para viviendas vulnerables en el barrio del Raval	Pieza: <b>Panel DM10</b>		Plano nº: <b>8</b>
Comprobado: <b>Alfredo Guardo Zabaleta</b>	Fecha: <b>15/04/2022</b>		Cantidad: <b>1</b>
Dibujado: <b>Dan Alexon Mendoza Hernandez</b>	Formato: <b>DIN A4</b>	Escala: <b>1:5</b>	Proyección: 
 <b>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA</b> <b>BARCELONATECH</b> Escola d'Enginyeria de Barcelona Est		Material: <b>DM10</b>	



Título: Evaluación de soluciones de rehabilitación energética para viviendas vulnerables en el barrio del Raval	Pieza: <b>Ensamblaje Pretapa</b>	Plano nº: <b>9</b>
Comprobado: <b>Alfredo Guardo Zabaleta</b>	Fecha: <b>15/04/2022</b>	Cantidad: <b>1</b>
Dibujado: <b>Dan Alexon Mendoza Hernandez</b>	Formato: <b>DIN A4</b>	Escala: <b>1:10</b>
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola d'Enginyeria de Barcelona Est	Material:	Proyección: 