



**UNIVERSIDAD
DE BURGOS**

Escuela Politécnica Superior

TESIS DOCTORAL

**SIMULACIÓN ENERGÉTICA
DE EDIFICIOS PARA
LA MEJORA DE LA
EFICIENCIA ENERGÉTICA
Y LA SOSTENIBILIDAD
AMBIENTAL DEL SECTOR
DE LA EDIFICACIÓN**

Raúl Briones Llorente

DIRECTORES:

**Dr. Eduardo Montero García
Dr. Ángel Rodríguez Saiz**

Burgos, 2020

El diseño de la portada, la contraportada y los separadores, es una abstracción geométrica basada en la transición de colores generada por la imagen de la simulación energética de un puente térmico. He elegido la zona más fría para que predominen el verde y el azul, que son los colores habitualmente relacionados con los conceptos de sostenibilidad y el medio ambiente.

The design of the front cover, back cover and dividers is a geometric abstraction based on the colour transition generated by the energy simulation image of a thermal bridge. I have chosen the coldest zone where green and blue predominate, which are the colours usually related to the concepts of sustainability and the environment.



**UNIVERSIDAD
DE BURGOS**

Escuela Politécnica Superior

TESIS DOCTORAL

**SIMULACIÓN ENERGÉTICA
DE EDIFICIOS PARA
LA MEJORA DE LA
EFICIENCIA ENERGÉTICA
Y LA SOSTENIBILIDAD
AMBIENTAL DEL SECTOR
DE LA EDIFICACIÓN**

Raúl Briones Llorente

DIRECTORES:

Dr. Eduardo Montero García

Dr. Ángel Rodríguez Saiz

Burgos, 2020



UNIVERSIDAD DE BURGOS

EDUARDO MONTERO GARCÍA, Catedrático de Universidad del Departamento de Ingeniería Electromecánica y ÁNGEL RODRÍGUEZ SAIZ, Profesor Titular de Universidad del Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno de la Universidad de Burgos,

CERTIFICAN,

Que la presente memoria “**Simulación energética de edificios para la mejora de la eficiencia energética y la sostenibilidad ambiental del sector de la edificación**” ha sido realizada bajo nuestra dirección por **D. RAÚL BRIONES LLORENTE** en el Programa de Doctorado de Eficiencia Energética y Sostenibilidad en Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Burgos y constituye su Tesis para optar al Grado de Doctor por la Universidad de Burgos. Esta memoria cuenta con nuestro informe favorable.

Y para que conste y en cumplimiento de la legislación vigente, firmamos el presente certificado en Burgos a 26 de octubre de 2020

Fdo.: Eduardo Montero García

Fdo.: Ángel Rodríguez Saiz

Sin ciencia no hay futuro.

No science, no future.

Sem ciência não há futuro.

ÍNDICE



Resumen	15
Abstract	19
1. Introducción	23
1.1. La sostenibilidad ambiental y la simulación en los edificios	25
1.2. Vinculación de la Tesis con proyectos de I+D+i	27
1.2.1. Contrato de I+D+i para la Modelización energética de dependencias del Hospital Universitario de Burgos mediante herramientas de simulación y evaluación de eficiencia energética	27
1.2.2. Proyecto Desafío Universidad-Empresa 2018, de la Estrategia Regional de Investigación e Innovación para una Especialización Inteligente de la Comunidad Autónoma de Castilla y León.....	28
1.2.3. Proyecto Prueba-Concepto 2018 del Plan de Transferencia del Conocimiento Universidad Empresa 2018-2020 de la Junta de Castilla y León	29
1.2.4. Proyecto de la Agencia Internacional de la Energía <i>IEA-EBC Annex 75. Cost-effective building renovation at district level Combining energy efficiency & Renewables</i>	30
1.3. Bibliografía	30
2. Objetivos.....	33
3. Método: Programas informáticos de simulación energética.....	37
3.1. Revisión del estado del arte	39
3.2. Comparación de los programas de simulación energética utilizados en esta Tesis.....	41
3.3. Aplicación de los programas de simulación energética utilizados en los proyectos de I+D+i vinculados a esta Tesis	52
3.4. Listado de tablas.....	55
3.5. Listado de figuras	55
3.6. Bibliografía	56



4. Discusión y resultados de la investigación	59
4.1. Resultado 1: Modelización energética de dependencias del Hospital Universitario de Burgos	61
4.1.1. Descripción general del HUBU	62
4.1.2. Definición geométrica	64
4.1.3. Descripción constructiva.....	69
4.1.4. Definición operacional	71
4.1.5. Archivos meteorológicos	71
4.1.6. Definición de las instalaciones	71
4.1.7. El problema surgido con el acoplamiento térmico de espacios adyacentes.....	72
4.2. Resultado 2: Estudio del comportamiento energético de nuevos materiales de construcción que incorporan elementos reciclados.....	77
4.3. Resultado 3: Estudio de coste – efectividad a nivel de distrito de medidas de eficiencia energética combinadas con energía renovable....	81
4.3.1. <i>IEA EBC Annex 75 - Cost-effective Building Renovation at District Level Combining Energy Efficiency & Renewables.....</i>	81
4.3.2. Descripción general del <i>Complejo Habitacional Picoto</i>	82
4.3.3. Definición geométrica	82
4.3.4. Descripción constructiva.....	88
4.3.5. Definición operacional	90
4.3.6. Archivos meteorológicos	90
4.3.7. Definición de las instalaciones	90
4.3.8. Resultados del caso de referencia.....	91
4.3.9. Resultados con las medidas de mejora	91
4.3.10. Estudio de coste – efectividad.....	96
4.3.11. Estudio del ciclo de vida	100



4.4.	Listado de tablas.....	100
4.5.	Listado de figuras	101
4.6.	Bibliografía	102
4.3.	<i>Result 3: District-level cost-effectiveness study of energy efficiency measures combined with renewable energy</i>	107
4.3.1.	<i>IEA EBC Annex 75 - Cost-effective Building Renovation at District Level Combining Energy Efficiency & Renewables.....</i>	109
4.3.2.	<i>General description of the Complejo Habitacional Picoto</i>	110
4.3.3.	<i>Geometric definition.....</i>	110
4.3.4.	<i>Constructive description</i>	116
4.3.5.	<i>Operational definition.....</i>	118
4.3.6.	<i>Weather data files.....</i>	118
4.3.7.	<i>Systems definition.....</i>	118
4.3.8.	<i>Reference case results.....</i>	119
4.3.9.	<i>Renovation measures results.....</i>	119
4.3.10.	<i>Cost-effectiveness assessment.....</i>	124
4.3.11.	<i>Life cycle assessment</i>	128
5.	Indicadores de calidad de la Tesis	129
5.1.	Publicaciones indexadas.....	131
5.2.	Contribuciones en congresos.....	132
5.3.	Proyectos de I+D+i	133
6.	Conclusiones y futuros trabajos	135
6.1.	Conclusiones	137
6.2.	Futuros trabajos.....	140



6. Conclusions and future works.....	143
6.1. <i>Conclusions</i>	145
6.2. <i>Future works</i>	148
7. Financiación de la Tesis	151
8. Actividades desarrolladas durante el periodo de Doctorado	155
9. Agradecimientos.....	179
Anexo 1. Artículo: <i>"Thermal Coherence of Concave Spaces Formed by Various Airnodes With Coupling by Means Of TRNYS"</i>	185
Anexo 2. Artículo: <i>"Testing of the Integrated Energy Behavior of Sustainable Improved Mortar Panels with Recycled Additives by Means of Energy Simulation"</i>	197
Anexo 3. Artículo: <i>"Ecological Design of New Efficient Energy-Performance Construction Materials with Rigid Polyurethane Foam Waste"</i>	217
Anexo 4. Artículo: <i>"Cost-effective building renovation at district level combining energy efficiency & renewables – Methodology assessment proposed in IEA Annex 75 and a demonstration case study"</i>	245

RESUMEN



Los edificios tienen un especial protagonismo en el impacto ambiental de la actividad humana sobre nuestro planeta, siendo responsables del 50 % del consumo de energía y del 30 % de las emisiones de gases de efecto invernadero. Para revertir su influencia en el agravamiento del cambio climático y reducir en lo posible su impacto ambiental, se están diseñando nuevas estrategias para mejorar su eficiencia energética teniendo en cuenta todo su ciclo de vida.

El objetivo general de esta Tesis es validar la simulación energética de edificios como herramienta de I+D+i, con el propósito de incrementar la eficiencia energética y minorar el impacto ambiental de los edificios, contribuyendo así a mitigar en lo posible el cambio climático y a reducir sus efectos adversos. Se han establecido criterios de aplicación de las diferentes herramientas de simulación disponibles según la finalidad del I+D+i a realizar. Estos criterios están orientados a la toma de decisiones por los distintos agentes intervinientes: diseñadores, gestores y responsables de su mantenimiento.

Se han aplicado distintas técnicas de simulación energética en cuatro proyectos de I+D+i, relacionados con el estudio energético de un hospital, el comportamiento energético de dos nuevos materiales de construcción con adición de residuos industriales valorizados, y el estudio de coste-efectividad de medidas de mejora de la eficiencia energética y de incorporación de energías renovables, a nivel de distrito. En todos los casos, los procedimientos de simulación energética empleados se han mostrado útiles para validar los requerimientos propuestos en cada proyecto de I+D+i.

Palabras clave: coste-efectividad, distrito urbano, eficiencia energética, materiales reciclados, simulación energética de edificios, sostenibilidad.

ABSTRACT



Buildings play a main role in the environmental impact of human activity on our planet, being responsible for 50 % of energy consumption and 30 % of greenhouse gas emissions. New strategies are being designed to improve their energy efficiency, considering their entire life cycle, in order to reverse their influence on the worsening of climate change and reduce their environmental impact as much as possible.

The general objective of this Thesis is to validate the energy simulation of buildings as an R&D&I tool, with the purpose of increasing energy efficiency and reducing the environmental impact of buildings, thus contributing to mitigate climate change as much as possible and reduce its adverse effects. Application criteria have been established for the different simulation tools available according to the purpose of the R&D&I to be carried out. These criteria are aimed at decision-making by the different intervening agents: designers, managers and those responsible for their maintenance.

Different energy simulation techniques have been applied in four R&D&I projects, related to the energy study of a hospital, the energy behaviour of two new construction materials with the addition of recovered industrial waste, and the cost-effectiveness study of measures to improve energy efficiency and the incorporation of renewable energies at the district level. The used energy simulation procedures have proven useful to validate the requirements proposed in each R&D&I project in all cases.

Keywords: buildings energy simulation, cost-effective, energy efficiency, recycled materials, sustainability, urban district.

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1. La sostenibilidad ambiental y la simulación en los edificios.

Los edificios y el entorno de su construcción juegan un papel muy importante en el impacto ambiental de la actividad humana sobre el planeta Tierra [1]. Si bien el propósito y utilidad de los edificios permanece casi invariable desde tiempos remotos, el impacto de la industria de la construcción en el medio ambiente se ha incrementado significativamente en la época de la sociedad industrializada [2]. Los informes internacionales sobre el consumo de energía indican que aproximadamente el 50 % del mismo corresponde a los edificios [3], así como son responsables del 30 % de las emisiones de gases de efecto invernadero [4].

Dado que el cambio climático es un problema global, los estados y las instituciones supranacionales están permanentemente implementando y actualizando políticas y estrategias para aminorar el impacto ambiental de los edificios, tanto de los de nueva construcción como de los existentes que se rehabilitan. Las estrategias para mejorar la eficiencia energética de los edificios y reducir su impacto ambiental son muy variadas y existen indicadores de tipo económico, medioambiental, social, tecnológico, urbanístico y administrativo para valorar este tipo de acciones [5].

La sostenibilidad ambiental de un edificio tiene muchas definiciones [6]. Para el propósito de este trabajo se podría definir como el diseño y construcción de un edificio que usa métodos y materiales que no comprometen el medioambiente ni la salud de sus ocupantes, trabajadores, o público en general, tanto de la generación actual como de las venideras. La puesta en práctica de esta idea se debe realizar en todas y cada una de las fases del edificio y su área urbana de influencia: diseño y concepción, construcción, operación, mantenimiento y demolición. Y debe ser cuantificable y evaluable [7].

La simulación del comportamiento de un edificio juega cada vez un papel más importante en el diseño y operación de un edificio para conseguir bajos consumos de energía y un reducido impacto ambiental. Esta simulación se define como el empleo de métodos matemáticos computacionales para representar sus características físicas, la operación actual o futura del edificio, las estrategias de control y sus sistemas energéticos. Desde un punto de vista práctico, la simulación de edificios se usa frecuentemente para: (i) realizar cálculos de cargas térmicas como base para el dimensionamiento de los sistemas de climatización; (ii) demostrar el cumplimiento de los códigos de construcción mediante la comparación del comportamiento energético de una nueva propuesta (materiales, geometrías, control, etc.) con la especificación



base del código; (iii) evaluar y comparar escenarios de diseño diversos [8]. Debe indicarse que el uso de la simulación de edificios está muy extendido en la fase de diseño y concepción del mismo, mientras que su empleo para evaluar la operación, control o rehabilitación de un edificio existente es aún muy limitado.

En relación con los programas a emplear, existen múltiples opciones sin que ninguna sea mejor en términos de compromiso entre precisión y facilidad de uso [9-10]. Además, muchos programas de simulación se usan para responder una amplia variedad de preguntas de arquitectos, ingenieros, constructores, usuarios y otros agentes intervinientes en la construcción. Por ello, es importante seleccionar el programa de simulación adecuado para el destinatario correspondiente. Utilizar un programa de simulación para un propósito distinto de aquel para el que está concebido puede llevar a errores de modelización y requiere, al menos, un conocimiento profundo del programa en cuestión.

Por último, debe señalarse la importancia de la utilización de los datos adecuados del edificio para la simulación del mismo. Por ejemplo, al modelizar edificios nuevos, el profesional simulador debe anticipar cómo se usará el edificio y definir con exactitud los objetivos de la simulación. En cambio, cuando se simulan edificios existentes, las inspecciones de campo y las auditorías energéticas se pueden usar para establecer datos de entrada fiables para los modelos energéticos. La correcta recopilación de datos no se puede sustituir por esfuerzos paralelos como, por ejemplo, intentos de calibración del modelo por el ajuste de los datos de entrada. El conocimiento exhaustivo del programa de simulación es muy necesario para la definición de modelos de simulación de una cierta complejidad, como *EnergyPlus* [11] o *TRNSYS®* [12].

El trabajo de Tesis que se presenta a continuación se enfoca hacia la utilización de la simulación energética de edificios como aportación significativa al I+D+i que permite proponer mejoras en el impacto ambiental del sector de la edificación. El valor añadido de este trabajo estriba en el establecimiento de criterios de aplicación diferenciada de herramientas de simulación según la necesidad de I+D+i, con objeto de obtener resultados fiables para la toma de decisiones. Se han aplicado estos criterios en campos diversos de la simulación como el estudio de cargas térmicas, la comparación del comportamiento energético de nuevos materiales y a la comparación de diversos escenarios de intervención de rehabilitación a nivel de barrio. Todos ellos con el enfoque de mejora de la eficiencia energética y la reducción del impacto medioambiental.



1.2. Vinculación de la Tesis con proyectos de I+D+i.

La realización de esta Tesis ha estado vinculada directamente con varios proyectos de I+D+i en el dominio de la simulación de energía en edificios, poniendo de manifiesto su aplicabilidad como herramienta de diagnóstico y evaluación.

1.2.1. Contrato de I+D+i para la Modelización energética de dependencias del Hospital Universitario de Burgos mediante herramientas de simulación y evaluación de eficiencia energética.

El grupo de investigación de la Universidad de Burgos en Ingeniería Energética suscribió con la empresa EFICANZA S.A. [13] un contrato de I+D+i para la modelización energética del Hospital Universitario de Burgos (HUBU) [14], con vigencia en el período 2016-2020. La empresa EFICANZA S.A. es la actual empresa gestora de todos los servicios del Hospital Universitario de Burgos (HUBU), salvo el servicio sanitario.

El objetivo del trabajo de la Universidad en este contrato era la validación por inter-comparación de un trabajo de simulación energética que la empresa EFICANZA S.A. iba a realizar con personal propio y de una consultora externa. La metodología a emplear era: (i) que la empresa EFICANZA S.A. y la consultora realizarían una simulación del hospital mediante la herramienta de CALENER-GT [15], programa reconocido por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico como procedimiento general para la certificación energética de edificios; (ii) que la Universidad realizaría una simulación de un número limitado de locales del hospital con una herramienta diferente, en este caso *TRNSYS*® [12] y otros programas complementarios, para tener resultados que, por inter-comparación, permitieran validar el resultado obtenido globalmente para todo el hospital por la empresa.

Parte de este trabajo de ingeniería ha supuesto también una contribución de I+D+i que se incluye en esta Tesis, y que se presenta en el “**Apartado 4.1**” y en el “**Anexo 1**”, consistente en la solución de simulación para el acoplamiento térmico de espacios adyacentes con el programa *TRNSYS*®.



1.2.2. Proyecto Desafío Universidad-Empresa 2018, de la Estrategia Regional de Investigación e Innovación para una Especialización Inteligente de la Comunidad Autónoma de Castilla y León.

La presente Tesis está vinculada también al proyecto de Investigación de Título “Conglomerados aligerados sostenibles de altas prestaciones, para su uso en Sistemas SATE” [16], presentado por el Grupo de Investigación de Ingeniería de la Edificación-Unidad de Investigación Consolidada 256 de Castilla y León al Concurso Desafío Universidad-Empresa, enmarcado en el Plan de Transferencia del Conocimiento Universidad-Empresas, de la Estrategia Regional de Investigación e Innovación para una Especialización Inteligente de Castilla y León (RIS3), promovida por la Junta de Castilla y León, la Fundación de Universidades y Enseñanzas Superiores de Castilla y León y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas [17].

El Proyecto de Investigación se desarrolló durante el año 2018 participando conjuntamente en el mismo el Grupo de Investigación de Ingeniería de la Edificación-Unidad de Investigación Consolidada 256 de Castilla y León y el Grupo de Investigación de Ingeniería Energética, ambos de la Universidad de Burgos.

El objetivo del proyecto fue el diseño de hormigones y morteros fabricados con residuos industriales valorizados, entre ellos espumas rígidas de poliuretano PU, para la fabricación de paneles modulares destinados a conformar el cerramiento de los edificios.

La inclusión de los residuos de poliuretano aporta a los morteros y hormigones propiedades que mejoran el comportamiento térmico y acústico del material. Aprovechando las sinergias investigadoras entre el Grupo de Investigación de Ingeniería de la Edificación y del Grupo de Investigación de Ingeniería Energética, se realizaron pruebas de simulación con los paneles modulares mediante el programa TRNSYS® [12], estudiando su contribución a la confortabilidad térmica de las edificaciones en diferentes situaciones de prestación.

Este trabajo de simulación ha supuesto una contribución de I+D+i que forma parte del proceso de I+D+i de la Tesis Doctoral, incluido en el “**Apartado 4.2**” y en el “**Anexo 2**”.



1.2.3. Proyecto Prueba-Concepto 2018 del Plan de Transferencia del Conocimiento Universidad Empresa 2018-2020 de la Junta de Castilla y León.

De forma análoga, la Tesis está relacionada con el Proyecto de Título “Prefabricados de altas prestaciones termo mecánicas mediante la utilización de morteros diseñados con adiciones de residuos industriales valorizados”, fue seleccionado en la V Edición de la Convocatoria de Proyectos de Investigación Prueba Concepto, enmarcada en el Plan de Transferencia del Conocimiento Universidad Empresa 2018-2020 de la Junta de Castilla y León [18].

El Proyecto de Investigación se desarrolló durante el año 2018 participando en el mismo el Grupo de Investigación de Ingeniería de la Edificación-Unidad de Investigación Consolidada 256 de Castilla y León y el Grupo de Investigación de Ingeniería Energética, ambos de la Universidad de Burgos.

El objetivo del proyecto fue el diseño de un panel prefabricado para construcción a partir de un mortero de cemento dosificado con áridos naturales y residuos industriales valorizados, escoria de acería EAF y espuma de poliuretano PU, con altas prestaciones mecánicas y térmicas. El mortero diseñado se caracterizó, tanto en estado fresco como endurecido, y posteriormente se utilizó como material base en la fabricación de paneles modulares para su uso en la envolvente del edificio. Posteriormente, se realizó un estudio de simulación energética con los paneles, con el objetivo de evaluar la influencia del nuevo panel de mortero en la demanda energética de un edificio, en comparación con los materiales tradicionales, además de un análisis detallado de la temperatura transitoria de la superficie interna de las paredes en situación de prestación. Las simulaciones se realizaron mediante el programa TRNSYS® [12].

Este trabajo de simulación ha supuesto una contribución de I+D+i que forma parte del proceso de I+D+i de la Tesis Doctoral, incluido en el “**Apartado 4.2**” y en el “**Anexo 3**”.

1.2.4. Proyecto de la Agencia Internacional de la Energía *IEA-EBC Annex 75. Cost-effective building renovation at district level Combining energy efficiency & Renewables.*

En 2019, el grupo de investigación de la Universidad de Burgos en Ingeniería Energética colaboró, como invitado, en el proyecto de la Agencia Internacional de la Energía *IEA-EBC Annex 75. Cost-effective building renovation at district level Combining energy efficiency & Renewables* [19], con vigencia en el período 2017-2022. Este proyecto, dirigido por la Dra. Manuela Almeida de la *Universidade do Minho* [20] (Portugal), involucra a veinticinco instituciones de trece países. El proyecto pretende analizar la relación coste-efectividad de la rehabilitación de edificios a nivel de distrito urbano, mediante la combinación de medidas de eficiencia energética y energías renovables. El análisis aborda aspectos energéticos, económicos y medioambientales resultado de las distintas variantes energéticas empleadas.

Parte de este trabajo ha supuesto una contribución de I+D+i que se incluye en esta Tesis, y que se presenta en el “**Apartado 4.3**” y en el “**Anexo 4**”, consistente en la simulación energética de diversas soluciones de mejora de la eficiencia energética combinadas con la implantación de energías renovables (bomba de calor, energía solar, biomasa...), en varios edificios que forman un distrito, mediante el programa *SG SAVE (Open Studio)* [21].

1.3. Bibliografía.

- [1] International Union of Architects UIA, An Architecture Guide to the UN 17 Sustainable Development Goals. <https://www.uia-architectes.org/webApi/uploads/ressourcefile/590/sdg_commission_un17_guidebook.pdf> Último acceso: 14/09/2020.
- [2] N. Hossaini, K. Hewage, R. Sadiq, Spatial life cycle sustainability assessment: a conceptual framework for net-zero buildings, *Clean Technol. Environ. Policy* 17 (2015) 2243–2253. <<https://doi.org/10.1007/s10098-015-0959-0>> Último acceso: 14/09/2020.
- [3] International Energy Agency, IEA (2019), *World Energy Statistics 2019*, IEA, Paris. <<https://doi.org/10.1787/2e828dea-en>> Último acceso: 14/09/2020.
- [4] Global Buildings Performance Network GBPN, *Buildings for Our Future: The Deep Path for Closing the Emissions Gap in the Building Sector*, 2013.



- [5] A. Kylili, P. A. Fokaides, P. A. Lopez Jimenez. Key Performance Indicators (KPIs) approach in buildings renovation for the sustainability of the built environment: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56 (2016) 906–915. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.096>> Último acceso: 14/09/2020.
- [6] G. E. Marjaba, S. E. Chidiac. Sustainability and resiliency metrics for buildings- Critical review. *Building and Environment* 101 (2016) 116-125. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.002>> Último acceso: 14/09/2020.
- [7] N. Lazar, K. Chithra. A comprehensive literature review on development of Building Sustainability Assessment Systems, *Journal of Building Engineering* 32 (2020) 101450. <<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101450>> Último acceso: 14/09/2020.
- [8] T. Hong, J. Langevin, K. Sun. Building simulation: Ten challenges. *Building Simulation* 11 (2018) 871–898. <<https://doi.org/10.1007/s12273-018-0444-x>> Último acceso: 14/09/2020.
- [9] D. Zhu, T. Hong, D. Yan, C. Wang. A detailed loads comparison of three building energy modeling programs: EnergyPlus, DeST and DOE-2.1E. *Building Simulation* 6 (2013) 323–335.
- [10] X. Zhou, T. Hong, D. Yan D. Comparison of HVAC system modeling in EnergyPlus, DeST and DOE-2.1E. *Building Simulation*, 7 (2014) 21–33.
- [11] EnergyPlus. <<https://energyplus.net/>> Último acceso: 17/09/2020.
- [12] TRNSYS®. Transient Systems Simulation Program. <<https://sel.me.wisc.edu/trnsys/index.html>> Último acceso: 17/09/2020.
- [13] EFICANZA S.A. <<https://www.EFICANZA.es/es/inicio>> Último acceso: 17/09/2020.
- [14] SACYL. Hospital Universitario de Burgos (HUBU). <<https://www.saludcastillayleon.es/CABurgos/es/complejo-hospitalario-burgos/hospital-universitario-burgos>> Último acceso: 17/09/2020.
- [15] CALENER-GT. <<https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/DocumentosReconocidos/Paginas/documentos-reconocidos-no-vigentes.aspx>> Último acceso: 18/09/2020.



[16] Transferencia del Conocimiento Universidad-Empresa 2018. Concurso Desafío Universidad Empresa. 3^{er} Premio Proyecto de Investigación Conglomerados aligerados sostenibles de altas prestaciones para su uso en Sistemas SATE. Junta de Castilla y León, España. <<https://www.redtcue.es/desafio/desafio-2018/ganadores>> Último acceso: 04/10/2020.

[17] Concurso de Proyectos de I+D+I Desafío Universidad Empresa. Estrategia Regional de Investigación e Innovación para una Especialización Inteligente de Castilla y León RIS3. Junta de Castilla y León, España.
<<https://www.redtcue.es/desafio/desafio-2018/bases>> Último acceso: 04/10/2020.

[18] V Edición Convocatoria Prueba Concepto: Impuso a la Valorización y Comercialización de Resultados de la Investigación. Fondo Europeo de Desarrollo Regional-Junta de Castilla y León, España. <<https://n9.cl/m2yb>> Último acceso: 04/10/2020.

[19] IEA EBC Annex 75 - Cost-effective Building Renovation at District Level Combining Energy Efficiency & Renewables. <<https://annex75.iea-ebc.org/>> Último acceso: 18/09/2020.

[20] Universidade do Minho. <<https://www.uminho.pt/PT>> Último acceso: 18/09/2020.

[21] SG SAVE (Open Studio). <<http://www.efinovatic.es/energyPlus/>> Último acceso: 18/09/2020.

CAPÍTULO 2

Objetivos



Como se ha indicado, el objetivo general de esta Tesis es validar la simulación energética de edificios como herramienta de I+D+i, con el propósito de incrementar la eficiencia energética y minorar el impacto ambiental del Sector de la Edificación, contribuyendo así a mitigar el cambio climático, y a mitigar sus efectos. Se pretende establecer criterios de aplicación de las diferentes herramientas de simulación disponibles según la finalidad del I+D+i a realizar. Estos criterios están orientados a la toma de decisiones.

Los objetivos concretos son:

- Estudiar y comparar los programas de simulación energética de edificios como herramientas útiles para representar sus características físicas, operacionales, estrategias de control y sus sistemas energéticos, actuales y futuros, para conseguir escenarios de bajo consumo energético y reducido impacto ambiental.
- Realizar mejoras de las hipótesis y condiciones de contorno necesarias para la resolución de soluciones singulares en casos especiales de simulación energética de edificios mediante estos programas.
- Simular energéticamente nuevos materiales más sostenibles para la construcción y la rehabilitación de edificios que, a lo largo de su ciclo de vida, no comprometan el medioambiente ni la salud de sus ocupantes, trabajadores, o público en general, tanto de la generación actual como de las venideras.
- Analizar, mediante la simulación energética, la relación coste-efectividad de la rehabilitación de edificios a nivel de distrito urbano, mediante la combinación de medidas de eficiencia energética y energías renovables, abordando aspectos energéticos, económicos y medioambientales, como resultado de las distintas variantes energéticas empleadas.

Los objetivos de esta Tesis tienen como destinatarios, entre otros, a los responsables políticos, a las empresas que trabajan en el campo de la transición energética, a los arquitectos e ingenieros que diseñan edificios y a los propietarios de edificios. Los resultados pueden servir de referencia para orientar la transformación, de manera rentable, del actual modelo de uso de la energía en el parque de edificios nuevos y existentes de las ciudades, con el objetivo de aplicar tecnologías que eviten las emisiones de gases de efecto invernadero y optimicen el consumo de energía.

CAPÍTULO 3

Método: Programas
informáticos de
simulación energética

3.1. Revisión del estado del arte.

Los programas de simulación energética de edificios son una herramienta esencial para ayudar a conseguir el objetivo de diseñar edificios más sostenibles a lo largo de todo su ciclo de vida, y en su relación con el medio ambiente y las personas que los ocupan o que habitan en su entorno. En los edificios nuevos, permiten estudiar anticipadamente sus demandas y consumos energéticos, así como las emisiones de CO₂ asociadas según el vector energético que se vaya a utilizar, y la influencia de la implementación de energías renovables. En los edificios existentes que se pretendan reformar, para mejorar su comportamiento energético y ambiental, facilitan la evaluación comparativa de distintas estrategias de intervención para conseguir esa finalidad, si bien en estos casos, las opciones suelen ser menores debido a los condicionantes que pueda tener el edificio construido.

Dentro del trabajo realizado en esta Tesis Doctoral, he hecho una revisión bibliográfica sobre los distintos programas de simulación energética que se utilizan actualmente, tanto para el estudio de nuevos edificios como de edificios existentes que se quieren renovar.

En [1] se presenta un interesante estudio comparativo de diez de estos programas de gran implantación, con un criterio de análisis unificado para todos ellos, con el objeto de elegir cuál es el más recomendable. Es de destacar que todos ellos muestran una estructura de datos de entrada similar, basada en: (i) la geometría y características constructivas del edificio; (ii) las instalaciones; (iii) las condiciones climáticas externas; (iv) las condiciones operacionales; (v) las cargas internas; (vi) otros parámetros específicos. Tras un análisis comparativo modelizando un mismo edificio residencial, *TRNSYS*® [2] ha resultado ser el programa mejor valorado según esta referencia bibliográfica.

[3] es un caso de estudio de un edificio residencial situado en Suecia, que sirve para comparar cuatro conocidos programas de simulación energética. Hace especial énfasis en el estudio horario anual de las demandas energéticas de calefacción y de las temperaturas operativas interiores, distinguiendo las zonas habitables de las zonas comunes. Comparando los resultados obtenidos con cada programa y sus principales características, ofrece una interesante tabla con sus puntos fuertes y débiles.

El artículo [4] muestra un caso de estudio por simulación energética de un edificio residencial en Suecia, tanto en su estado inicial como con la aplicación de medidas de

mejora energética. Se han identificado los principales parámetros de entrada empleados, qué valores se asumen, y se ha realizado un estudio de sensibilidad al aplicar variaciones sobre los mismos, contemplando distintas fuentes para el suministro de dichos datos. Finalmente, se muestran los cambios en los resultados del rendimiento energético del edificio que provocan el rango de valores que puede tomar cada parámetro de entrada, poniendo de manifiesto la necesidad de que estos datos sean lo más realistas posible.

En [5], los mismos autores siguen la línea de trabajo del artículo anterior obteniendo conclusiones parecidas, pero destacando la importante influencia en la demanda de calefacción de las cargas internas debidas a los equipamientos eléctricos del edificio simulado, según hayan sido consideradas en la modelización, tras realizar un estudio comparativo y de sensibilidad variando distintos parámetros de entrada. Esta influencia es mayor en escenarios de edificios de alta eficiencia energética respecto a los edificios convencionales.

Otra investigación [6] plantea el estudio de un edificio de bajo consumo de energía formado por varias viviendas unifamiliares, situado en la Costa Este de Suecia. Se utilizan tres programas de simulación energética diferentes, y los resultados obtenidos a nivel de proyecto son muy similares. Se han comparado con los datos obtenidos de monitorizar las viviendas durante dos años, y, además, se ha hecho un estudio de sensibilidad variando los datos de entrada del flujo ventilación, del rendimiento del intercambiador de calor y de las ganancias internas. La correcta definición de los intercambiadores es el aspecto que más influye en este sentido, pero resulta más importante definir correctamente el comportamiento de los ocupantes de las viviendas que influye directamente en las demandas energéticas.

El artículo [7] está escrito por los desarrolladores de *EnergyPlus* [8]. En él explican muy detalladamente cómo ha surgido este programa como evolución y fusión de las mejores características de los dos primeros programas de simulación energética que se desarrollaron por los Departamentos de Defensa y de Energía de Estados Unidos en los años 60: *BLAST* [9] y *DOE2* [10]. Algunas de las características innovadoras, son: (i) variables para el paso de tiempo en los cálculos; (ii) sistema modular configurable para el balance de masa y energía por zonas; (iii) facilidades para que los desarrolladores generen *interfaces* para el usuario; (iv) cálculo del flujo de aire entre zonas; (v) amplia variedad de elementos para instalaciones, que, además, pueden ser modificadas o generadas mediante programación por un usuario avanzado.

Un completo trabajo [11] ofrece una revisión del estado del arte de los programas de simulación energética más ampliamente utilizados a nivel mundial. Se centra en el estudio de veinte de estos programas, partiendo de las características suministradas por sus desarrolladores. Tras describir cada uno de ellos, los compara en tablas con catorce categorías diferentes, y comenta el contenido de las más importantes. Se recomienda a los usuarios de programas de simulación energética no centrarse en uno sólo, sino conocer varios con diferentes prestaciones. Por ejemplo, los más sencillos para utilizarlos en las etapas iniciales del diseño de un edificio, y los que permiten un mayor grado de definición, para cuando se trabaja a nivel de proyecto de ejecución.

Por último, en una guía [12] editada por el IDAE, se exponen las claves acerca de la simulación térmica de los edificios mostrando los conceptos fundamentales que intervienen en la misma. Ofrece una revisión del estado del arte sobre la simulación de edificios, haciendo especial énfasis en el programa del Departamento de Energía de Estados Unidos, *DOE2*, ya que es en el que se basa la Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC) [13]. Presenta una minuciosa comparación entre las capacidades de los programas estudiados a través de trece tablas.

3.2. Comparación de los programas de simulación energética utilizados en esta Tesis.

Como he descrito en la sección anterior, existe una amplia variedad de programas de simulación energética de edificios, con propósitos y capacidades diversas. Además, la rápida evolución de los sistemas de hardware y software de las últimas décadas contribuye a la evolución y modificación de estos programas, algunos de los cuales desaparecen, otros mejoran en prestaciones, y otros nuevos aparecen. De entre los posibles programas, sólo tres se han seleccionado para esta Tesis debido a la combinación de algunas de las siguientes circunstancias:

- Ámbito internacional del programa de simulación, dado que las tareas de I+D+i de la Universidad tienen este alcance en el dominio de la eficiencia energética en los edificios.
- Aplicación del programa en el ámbito nacional de España, para contribuir como innovación tecnológica aportada por la Universidad en contratos de consultoría y transferencia de conocimiento con empresas.
- Posibilidad de disponer de licencias profesionales de los programas, dentro de la disponibilidad económica de la Universidad.

Los programas seleccionados son los siguientes:

- **TRNSYS® [2]:** *Transient System Simulation package (TRNSYS v.17, Thermal Energy System Specialists, LLC, Madison, WI, USA)*, es un software extremadamente flexible basado en un entorno gráfico, usado para simular el comportamiento de sistemas transitorios, como edificios. Está compuesto por dos partes. La primera lee y procesa los datos de entrada, resuelve iterativamente el sistema, determina la convergencia e imprime las variables del sistema. La segunda parte es una extensa librería de componentes que sirven para modelar el funcionamiento de una parte del sistema. Para la definición gráfica del edificio en tres dimensiones, se apoya en el programa de dibujo vectorial *Google Sketchup [14]* con el complemento *TRNSYS3D [15]*. No está diseñado para justificar el cumplimiento de la normativa energética española, aunque se podría hacer de un modo indirecto, y no está reconocido por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico como procedimiento válido para la certificación energética de edificios. En las (Figuras 1-2) muestro dos imágenes de la *interface* de *TRNSYS®*.

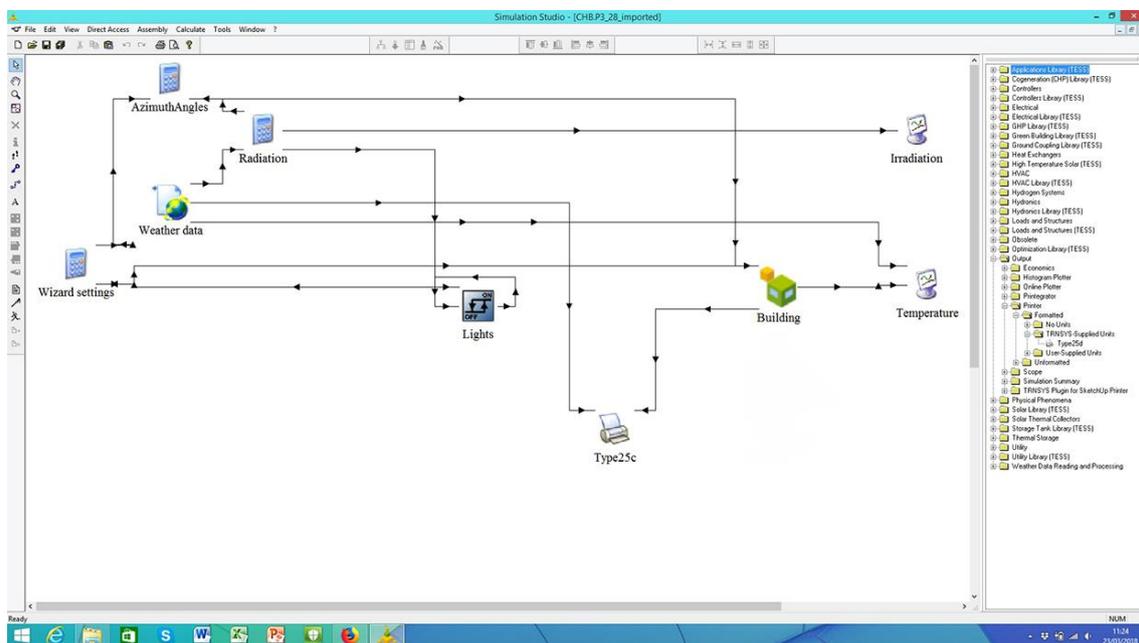


Figura 1: Interface principal de TRNSYS®

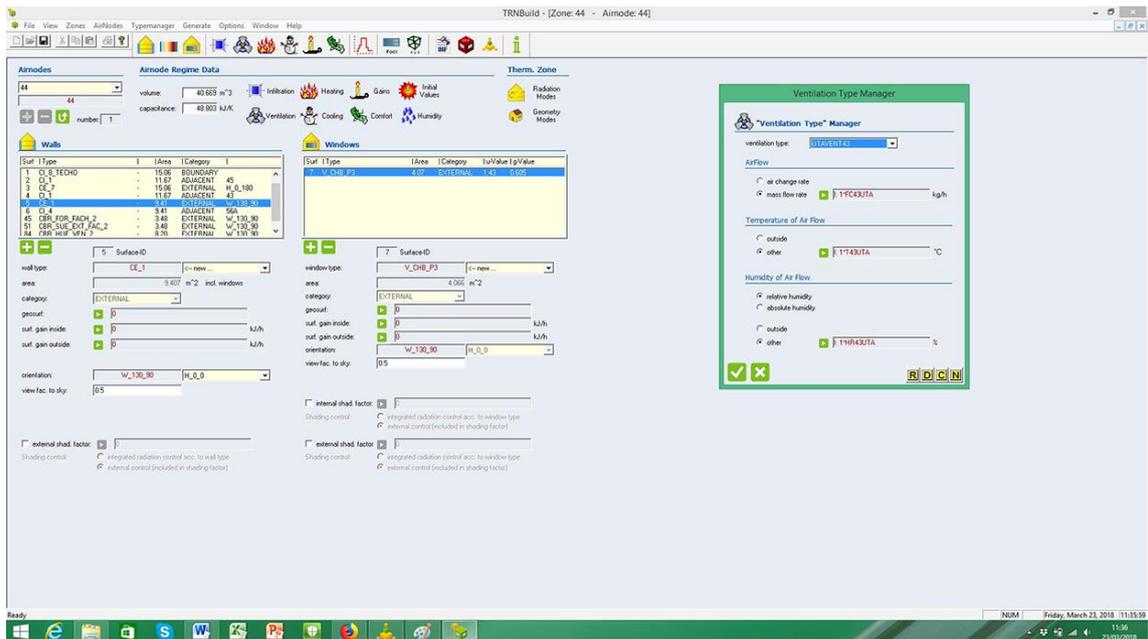


Figura 2: Interface de TRNSYS® - TRNBuild

- **Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC)** [13]: Es una aplicación informática de uso libre con fines de justificación administrativa, que permite obtener los resultados necesarios para la verificación de una serie de exigencias del Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE) [16] del Código Técnico de la Edificación. Además, está reconocido por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico como procedimiento válido para la certificación energética de cualquier tipo de edificio. Ha sido desarrollado por el Grupo de Termotecnia de la Asociación de Investigación y Cooperación Industrial de Andalucía (AICIA), con la colaboración del Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción (IETCC). Usa el motor de cálculo del programa DOE2. A pesar de ser un programa de simulación energética, no ofrece datos complementarios a los meramente necesarios para verificar el cumplimiento de la normativa española en materia de eficiencia energética. En la (Figura 3) muestro una imagen de la interface de la Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC).

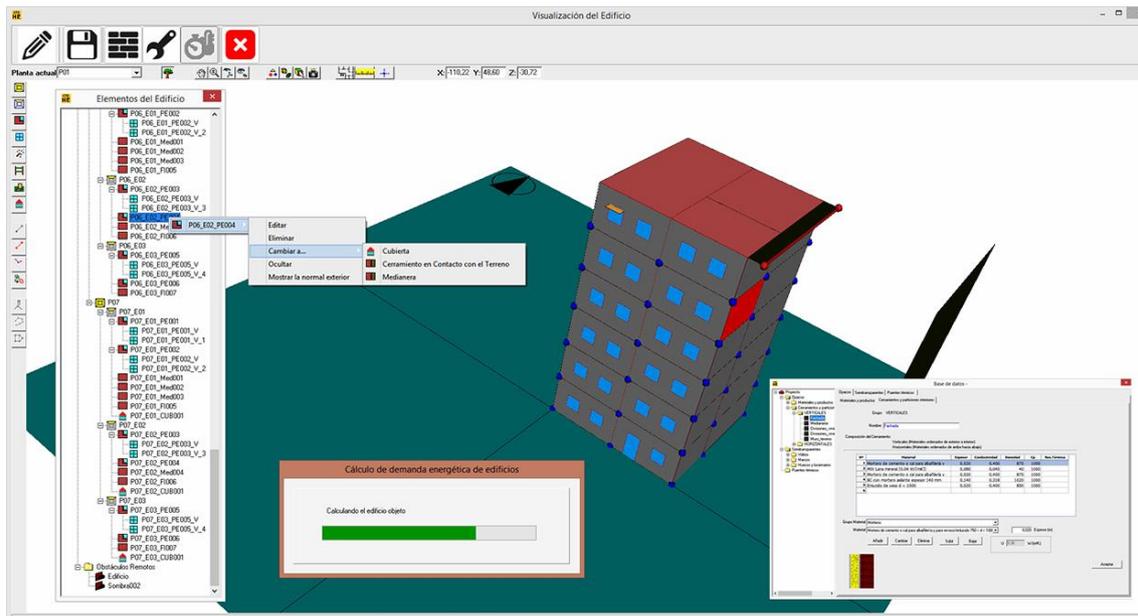


Figura 3: Interface de HULC

- SG SAVE (Open Studio) [17]:** Es un moderno programa de simulación energética de edificios de uso libre creado por la empresa *Efinovatic*. Está reconocido por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico para la certificación energética de cualquier tipo de edificio, y permite la verificación del Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE) del Código Técnico de la Edificación. Presenta una *interface* de entrada de datos bastante amable con el usuario, y que a la hora de hacer los cálculos se conecta al programa *Open Studio* [18], que es un conjunto de aplicaciones de *software* gratuitas y de código abierto para el análisis energético de los edificios basado en *EnergyPlus* [8]. Además, desde *Open Studio* se pueden definir elementos más complejos que los que permite *SG SAVE (Open Studio)*, por lo que sirve para completar un trabajo complejo, y también permite obtener un análisis muy detallado de los resultados de la simulación energética. Por último, cabe señalar que para la modelización gráfica de los edificios en tres dimensiones utiliza *Google Sketchup*, al igual que *TRNSYS®*. En las (Figuras 4-5) muestro dos imágenes de las *interfaces* de *SG SAVE (Open Studio)* y de *Open Studio*, respectivamente.

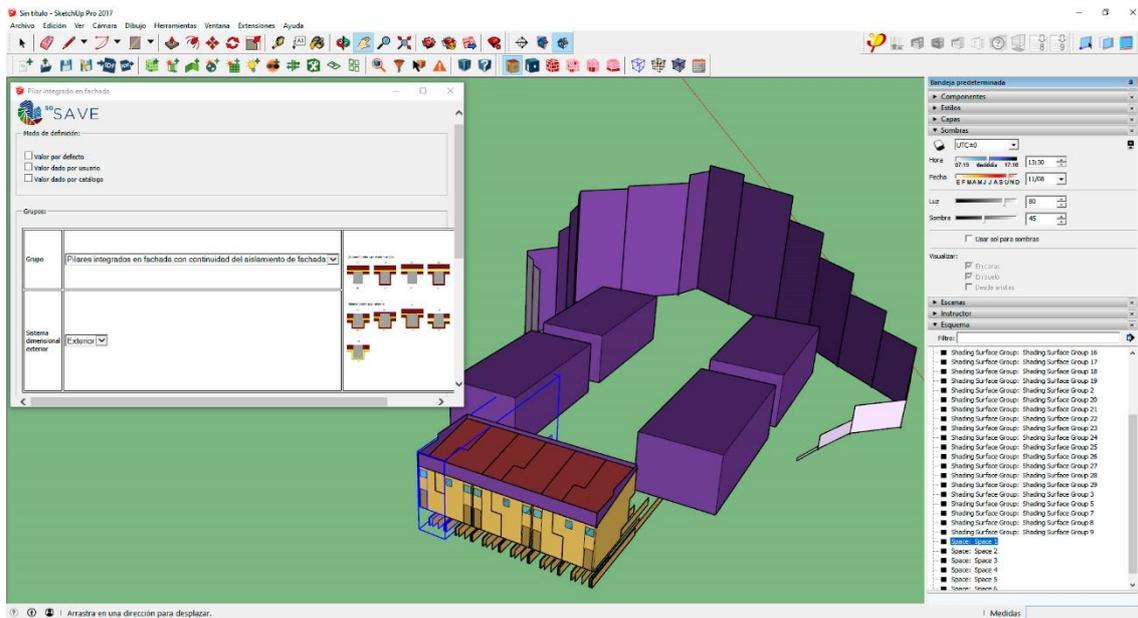


Figura 4: Interface de SG SAVE (Open Studio)

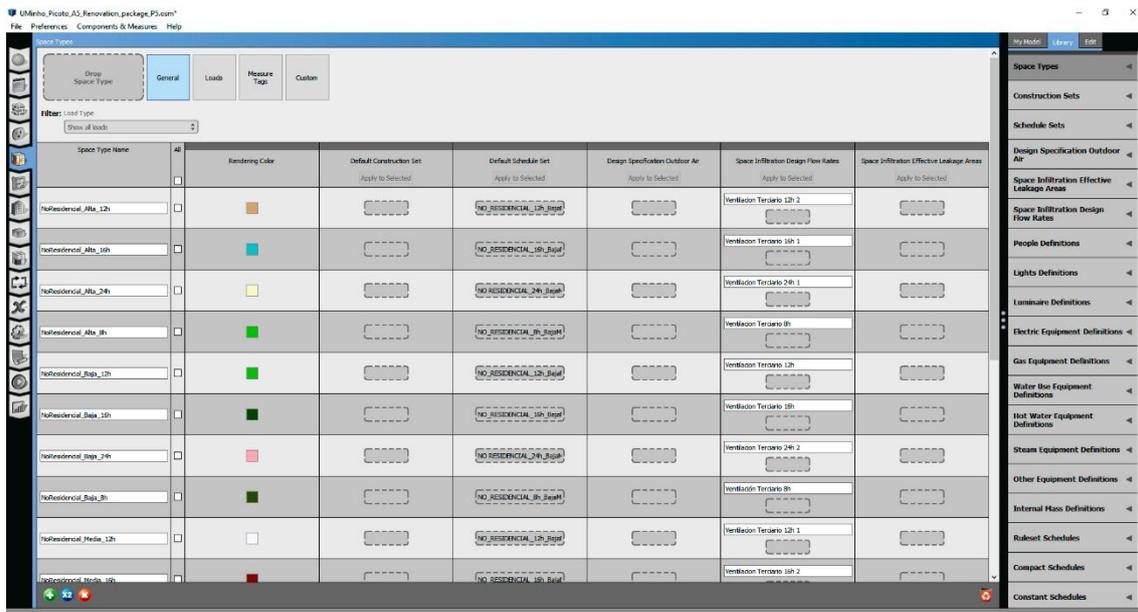


Figura 5: Interface de Open Studio

La valoración comparativa de los programas de simulación energética de edificios es un ejercicio subjetivo, en el que se han de tener en cuenta la finalidad de la simulación y el compromiso entre precisión y coste de simulación. A ello se une el necesario grado de conocimiento del evaluador de cada uno de los programas.

En las (Tablas 1-6) se presenta un análisis comparativo de los parámetros más significativos de estos programas de simulación energética, categorizados en seis niveles:

- Características generales.
- Definición gráfica.
- Definición constructiva.
- Definición operacional.
- Definición de instalaciones.
- Informes de resultados.

CARACTERÍSTICAS GENERALES	PROGRAMA DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS		
	TRNSYS®	Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC)	SG SAVE (Open Studio)
Validación IEA BESTEST	SI	SI	SI
Varios módulos o programas	SI	SI	SI
Modelización térmica multizona	SI	SI	SI
Limitación de zonas térmicas	NO	SI	NO
Limitación de elementos constructivos	NO	SI	NO
Simulación en paso horario	SI	SI	SI
Simulación en paso sub-horario	SI	NO	SI
Datos no modificables visibles	SI	NO	SI
Funcionamiento estable	SI	NO	SI
Programación con otro software	SI	NO	NO
Archivos meteorológicos internacionales	SI	NO	SI
Uso gratuito	NO	SI	SI
VALORACIÓN	BIEN	REGULAR	BIEN

Tabla 1: Comparación de los programas de simulación energética – Características generales

En cuanto a las características generales, TRNSYS® destaca por su flexibilidad en la introducción de datos, incluyendo la posibilidad de programación, el conocimiento de los datos de entrada asumidos, así como en su potencia de cálculo. Sin embargo, su precio es muy elevado.

La Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC) presenta limitaciones en la cantidad de datos que se pueden introducir, lo que limita el tamaño de los edificios que se pueden estudiar. Además, los datos de salida sólo se refieren al cumplimiento, o no, de la normativa energética española. Su uso es libre y gratuito.

SG SAVE (*Open Studio*) presenta unas características similares a las de TRNSYS®, aunque no permite la programación, con la ventaja de que además sirve para justificar la normativa energética española, y que su uso también es libre y gratuito.

DEFINICIÓN GRÁFICA	PROGRAMA DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS		
	TRNSYS®	Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC)	SG SAVE (<i>Open Studio</i>)
Interface amable para modelado 3D	SI	NO	SI
Modelado 3D con <i>Google Sketchup</i>	SI	NO	SI
Admite planos CAD	SI	SI	SI
Visualización 3D simultanea	NO	SI	SI
Zonas térmicas cóncavas	NO	SI	SI
Límite de vértices por zona térmica o planta	NO	SI	NO
Facilidad para definir sombras	SI	NO	SI
VALORACIÓN	REGULAR	MAL	BIEN

Tabla 2: Comparación de los programas de simulación energética – Definición gráfica

TRNSYS® tiene una muy buena herramienta de definición gráfica al estar apoyada en el uso de *Google Sketchup*, que es un programa de diseño en tres dimensiones muy capaz e intuitivo. Pero presenta un problema al no permitir generar espacios con forma cóncava, lo que obliga a aumentar su número y a tener que hacer operaciones de acoplamiento térmico. También sería deseable poder acceder a la visualización del modelo mientras se definen los elementos constructivos, las condiciones operacionales y las instalaciones.

La Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC) posee un método propio integrado para definir gráficamente lo edificios, que es complejo e inestable al trabajar con edificios grandes, y además presenta algunas limitaciones. Sin embargo, permite la visualización del modelo durante el resto del proceso, salvo con las instalaciones.

SG SAVE (Open Studio) presenta unas características similares a las de *TRNSYS®* debido a que también trabaja con *Google Sketchup*, y sin embargo, sí que permite definir espacios cóncavos.

DEFINICIÓN CONSTRUCTIVA	PROGRAMA DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS		
	<i>TRNSYS®</i>	Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC)	<i>SG SAVE (Open Studio)</i>
Interface amable para definición constructiva	NO	SI	NO
Definición abierta de los materiales opacos	SI	SI	SI
Definición abierta de los vidrios	NO	SI	SI
Definición de retranqueos en ventanas	NO	SI	SI
Puentes térmicos parametrizables	NO	SI	SI
VALORACIÓN	MAL	BIEN	BIEN

Tabla 3: Comparación de los programas de simulación energética – Definición constructiva

La definición de los elementos constructivos con *TRNSYS®*: (i) materiales; (ii) cerramientos y particiones; (iii) puentes térmicos; (iv) huecos, resulta muy laboriosa al no tener incorporada la base de datos [19] acorde con la normativa española [16], y además ser incompatible al utilizar distintas unidades para definir las propiedades termofísicas. Esto obliga a tener que definir desde cero todos ellos, teniendo en cuenta además que existen limitaciones a la hora de nombrarlos. Por último, la biblioteca de vidrios está bloqueada, y sólo se pueden crear modelos nuevos utilizando un programa externo.

La Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC) tiene, en este aspecto, el mejor sistema de definición constructiva. Es muy intuitivo, flexible, y no requiere del uso de otros programas. Incluye la base de datos [19] pero permite crear nuevos elementos.

SG SAVE (Open Studio) es igual de flexible y también incluye la base de datos [19]. Sin embargo, la *interface* es menos intuitiva que el de la Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC). Además, para asignar al modelo en tres dimensiones cerramientos diferentes a los definidos como tipo, por ejemplo, una “Fachada 2” en vez de una “Fachada tipo”, hay que acceder a *Open Studio*, cuyo manejo es más complejo.

DEFINICIÓN OPERACIONAL	PROGRAMA DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS		
	TRNSYS®	Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC)	SG SAVE (<i>Open Studio</i>)
Interface amable para definición operacional	NO	SI	SI
Variación de cargas internas	SI	NO	SI
Variación de horarios	SI	NO	SI
Variación de temperaturas de consigna	SI	NO	SI
VALORACIÓN	BIEN	MAL	BIEN

Tabla 4: Comparación de los programas de simulación energética – Definición operacional

TRNSYS® permite definir cualquier condición operacional con horarios para ocupación y todo tipo de cargas internas. No tiene ningún valor predefinido que se pueda adoptar, así que exige definir muy laboriosamente dichas condiciones, que, además, han de aplicarse a cada zona térmica por separado.

La Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC) tiene predefinidos todos los perfiles de uso de acuerdo con el DB-HE, con diferentes condiciones operacionales según se trate uso residencial o de varios tipos de uso terciario. Es muy fácil seleccionarlos y aplicárselos a todo el edificio, aunque también permite personalizarlos por espacios. Sin embargo, no permite definir otros perfiles de uso diferentes.

SG SAVE (*Open Studio*) incorpora los mismos perfiles de uso que la Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC), y también es muy sencilla su elección y aplicación. Además, entrando en *Open Studio*, se puede definir cualquier otro diferente.

INSTALACIONES	PROGRAMA DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS		
	TRNSYS®	Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC)	SG SAVE (<i>Open Studio</i>)
Interface amable para definición de las instalaciones	NO	SI	SI
Plantillas para definir instalaciones	SI	SI	SI
Ventilación mecánica con recuperador de calor	SI	SI	SI
Dimensionamiento automático de algunos equipos	NO	NO	SI
VALORACIÓN	REGULAR	BIEN	BIEN

Tabla 5: Comparación de los programas de simulación energética – Instalaciones

La definición de las instalaciones con TRNSYS® se puede hacer utilizando las *Tess Libraries*, que están formadas por más de quinientos componentes de instalaciones para su uso en TRNSYS®. Dichos modelos son parametrizables y adaptables a la realidad del modelo existente en el edificio, e incluyen el código fuente para poder realizar cambios. También es posible programar desde cero nuevos elementos para estas librerías. En cualquier caso, exige al usuario unos conocimientos bastante avanzados, así como saber conectar uno a uno cada componente con el edificio, y entre sí, cuando es necesario.

La Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC) tiene plantillas predefinidas para sistemas, equipos, unidades terminales y curvas de funcionamiento, que se pueden parametrizar con datos suministrados por los fabricantes. Su asociación al edificio, a cada espacio, o grupo de espacios es sencilla.

SG SAVE (*Open Studio*) también tiene plantillas para definir distintos sistemas y sus componentes. Puede no hacer falta definir algunos equipos porque es capaz de auto dimensionarlos. Además, acudiendo a *Open Studio*, se pueden modificar algunos datos, y definir sistemas mucho más complejos, aunque esto último requiere que el usuario tenga conocimientos avanzados.

INFORMES DE RESULTADOS	PROGRAMA DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS		
	TRNSYS®	Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC)	SG SAVE (<i>Open Studio</i>)
Justificación del DB-HE	NO	SI	SI
Certificación energética	NO	SI	SI
Comparación de caso base con medidas de mejora	NO	NO	NO
Demandas y consumos anuales	SI	SI	SI
Emisiones de CO ₂ anuales	NO	SI	SI
Demandas y consumos detallados	SI	NO	SI
Emisiones de CO ₂ detalladas	NO	SI	SI
Resultados por zonas térmicas	SI	NO	SI
Cálculos de confort	SI	NO	SI
Otras variables detalladas	SI	NO	SI
VALORACIÓN	REGULAR	MAL	BIEN

Tabla 6: Comparación de los programas de simulación energética – Informes de resultados

TRNSYS® no genera como tales informes de resultados maquetados. Antes de realizar la simulación energética, hay que decirle que variables queremos que calcule, dentro de las muchísimas opciones que ofrece. Genera salidas tipo hoja de cálculo o gráficas. No sirve para justificar directamente la normativa energética española [16] ni para realizar la certificación energética del edificio.

La Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC) sólo emite informes maquetados para justificar la normativa energética española [16] y para realizar la certificación energética del edificio. No se puede consultar ninguna variable más de salida, aunque al hacer la simulación energética su motor de cálculo haya generado más datos.

SG SAVE (*Open Studio*) tiene las mismas prestaciones en cuanto a la justificación normativa que la Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC), y además emite otro informe maquetado con más datos de salida complementarios. Adicionalmente, acudiendo a *Open Studio*, se puede programar el cálculo de otras variables con un alcance similar al de TRNSYS®. Así, es el programa más completo.

3.3. Aplicación de los programas de simulación energética utilizados en los proyectos de I+D+i vinculados a esta Tesis.

En la sección de “**Introducción**” se describieron los cuatro proyectos de I+D+i con los que esta Tesis está vinculada: (i) Contrato con la empresa EFICANZA S.A. [21] para la modelización energética de dependencias del Hospital Universitario de Burgos [22] mediante herramientas de simulación y evaluación de eficiencia energética; (ii) Proyecto Desafío Universidad-Empresa 2018, de la Estrategia Regional de Investigación e Innovación para una Especialización Inteligente de la Comunidad Autónoma de Castilla y León; (iii) Proyecto Prueba-Concepto 2018 del Plan de Transferencia del Conocimiento Universidad Empresa 2018-2020 de la Junta de Castilla y León; (iv) Proyecto de la Agencia Internacional de la Energía *IEA-EBC Annex 75. Cost-effective building renovation at district level Combining energy efficiency & Renewables*.

He utilizado *TRNSYS®* [2] para realizar las simulaciones energéticas de los proyectos de I+D+i que figuran en el “**Apartado 4.1**” y en el “**Apartado 4.2**” de esta Tesis.

Para el proyecto de I+D+i que figura en el “**Apartado 4.1**” de esta Tesis, basado en la modelización energética del Hospital Universitario de Burgos, la empresa EFICANZA S.A. ha trabajado con el programa CALENER-GT [23]. Lo ha hecho tanto accediendo a la programación de su motor de cálculo con la autorización previa de sus desarrolladores, para poder introducir datos directamente, como utilizando la Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC) [13]. El grupo de investigación de la Universidad de Burgos en Ingeniería Energética tuvo que elegir un programa alternativo para realizar una simulación energética en paralelo de algunas zonas representativas del hospital. Debía de ser un programa más capaz que CALENER-GT, para ofrecer los mismos datos de demandas y consumos anuales con mayor fiabilidad, y, además, otros datos complementarios que sirvieran para asegurar la bondad de los cálculos y poder realizar una calibración entre los resultados obtenidos entre ambos programas. La elección fue el programa *TRNSYS®* debido a que podía cumplir esas expectativas, disponíamos de licencias de uso para nuestro grupo de investigación, y teníamos unos conocimientos iniciales sobre su manejo. Por otra parte, faltaban todavía dos años hasta que apareciera el programa *SG SAVE (Open Studio)* [17].

También he utilizado *TRNSYS®* para el proyecto de I+D+i que figura en el “**Apartado 4.2**” de esta Tesis, porque me ha permitido simular el comportamiento de los nuevos materiales de construcción reciclados en partes del edificio del hospital, y porque he



podido hacer el estudio detallado de algunas variables, como la temperatura superficial de las paredes.

Una vez mejorada la formación y adquirida más experiencia al ir desarrollando el trabajo, puedo hacer las siguientes consideraciones:

- La definición gráfica en tres dimensiones fue laboriosa por la entidad del edificio, aunque de fácil manejo.
- El hecho de que *TRNSYS*® no admita zonas térmicas cóncavas supuso una dificultad añadida, ya que tuve que descomponer muchas de ellas en subzonas, o *airnodes*, en forma de rectángulo para evitarlo. El caso más problemático fueron las tres plantas de hospitalización modelizados, que pasaron así de tener cada una 69 zonas térmicas a 107.
- Las zonas que tuvieron que dividirse en varios *airnodes* disponían necesariamente de paredes virtuales para separarlos. Esto originó incoherencias físicas entre las temperaturas interiores de cada uno de ellos, ya que al ser parte de una misma zona deberían casi iguales. El estudio y la resolución de este problema dio lugar a la publicación del artículo científico que figura en el “**Anexo 1**” de esta Tesis.
- La base de materiales constructivos opacos y transparentes no es compatible con la de la Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC), por lo que tuve que copiar las propiedades termofísicas de un buen número de materiales, hacer los correspondientes cambios de unidades, y generar de nuevo todos los materiales, cerramientos, puentes térmicos y huecos.
- Algo parecido sucedió al definir todas las condiciones operacionales, con los horarios para las cargas internas, ventilación y temperaturas de consigna.
- Haciendo balance, creo que hoy en día sería mejor utilizar el programa *SG SAVE (Open Studio)* para este trabajo. Además, hay que tener en cuenta su elevado coste.

He utilizado la Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC) para realizar algunas simulaciones energéticas auxiliares de los proyectos de I+D+i que figuran en el “**Apartado 4.1**” y en el “**Apartado 4.2**” de esta Tesis, así como para consultar su amplia base de datos de propiedades termofísicas de materiales de construcción para todos los proyectos de I+D+i realizados. Además, y en relación con el proyecto de I+D+i que figura en el “**Apartado 4.1**”, hay que destacar que la empresa EFICANZA S.A. ha realizado la simulación energética del Hospital Universitario de Burgos con el programa CALENER-GT, al que se accede desde la Herramienta Unificada LIDER-



CALENER (HULC) para definir las instalaciones de los grandes edificios terciarios, como es el caso. Esto me ha obligado a tener que manejar repetidas veces ambos programas para comparar datos de cara a la simulación energética que estaba realizando en paralelo con *TRNSYS*®.

Así, la Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC) no la he utilizado como programa principal de simulación energética en ninguno de los proyectos de I+D+i vinculados a esta Tesis. La he usado, junto con CALENER-GT, para consultar el trabajo de modelización del Hospital Universitario de Burgos realizado por la empresa EFICANZA S.A. También, como base de datos para componer materiales, cerramientos opacos, puentes térmicos y huecos, ya que incluye el catálogo [19] del Código Técnico de la Edificación. Pero basándome en experiencias previas, considero que es un programa de exigente manejo, especialmente en la parte gráfica, y que pese a hacer simulaciones energéticas anuales con paso horario, al final ofrece muy pocos datos teniendo en cuenta la cantidad de datos de entrada introducidos. Esto es coherente con la finalidad de justificación administrativa con la que fue creado, como ya he explicado anteriormente. Sin embargo, la aparición de opciones simplificadas como CE3X [24] que permiten realizar estas justificaciones más fácilmente, o la de *SG SAVE (Open Studio)*, que además de las justificaciones permite obtener un estudio energético detallado del edificio, pueden hacerla caer en desuso.

He utilizado *SG SAVE (Open Studio)* para realizar las simulaciones energéticas del proyecto de I+D+i que figura en el “**Apartado 4.3**” de esta Tesis.

Para este proyecto, tras hacer una valoración con los profesores de la Universidade do Minho [25] de los puntos fuertes y débiles de los tres programas de simulación energética que yo sabía manejar, decidimos que utilizase el programa *SG SAVE (Open Studio)*. Estas son algunas de las razones:

- A nivel normativo, no tienen ningún valor las justificaciones que realiza del cumplimiento de la normativa energética española, ya que iba a estudiar edificios situados en Portugal. Pero esta parte se puede obviar, y enlazar con los resultados detallados que ofrece cuando calcula en modo *Open Studio* [18], necesarios en un proyecto de esta entidad.
- Esta misma flexibilidad permite aprovechar datos de entrada basados en la normativa española, y luego adaptarlos a la normativa portuguesa.
- Dentro del proyecto de investigación *IEA EBC Annex 75* [26], investigadores de otros países participantes también iban a utilizar programas basados en

EnergyPlus [8], por lo que podía resultar un elemento unificador a la hora de comparar resultados.

- Los profesores de la *Universidade do Minho* ya usaban habitualmente el programa *Open Studio*.
- Personalmente, considero un acierto la elección de este programa. Podría haberlo realizado también con *TRNSYS®*, pero habría resultado más laborioso e incompatible con otros usuarios. No habría sido posible realizarlo con la Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC) por las limitaciones expuestas anteriormente.

3.4. Listado de tablas.

Tabla 1: Comparación de los programas de simulación energética – Características generales.

Tabla 2: Comparación de los programas de simulación energética – Definición gráfica.

Tabla 3: Comparación de los programas de simulación energética – Definición constructiva.

Tabla 4: Comparación de los programas de simulación energética – Definición operacional.

Tabla 5: Comparación de los programas de simulación energética – Instalaciones.

Tabla 6: Comparación de los programas de simulación energética – Informes de resultados.

3.5. Listado de figuras.

Figura 1: *Interface* principal de *TRNSYS®* (© Raúl Briones Llorente).

Figura 2: *Interface* de *TRNSYS® - TRNBuild* (© Raúl Briones Llorente).

Figura 3: *Interface* de HULC (© Raúl Briones Llorente).

Figura 4: *Interface* de *SG SAVE (Open Studio)* (© Raúl Briones Llorente).

Figura 5: *Interface* de *Open Studio* (© Raúl Briones Llorente).



3.6. Bibliografía.

- [1] Amin H. Al Ka'bi. Comparison of energy simulation applications used in green building. *Annals of Telecommunications* 75 (2020) 271–290.
<<https://doi.org/10.1007/s12243-020-00771-6>> Último acceso: 19/09/2020.
- [2] TRNSYS®. Transient Systems Simulation Program.
<<https://sel.me.wisc.edu/trnsys/index.html>> Último acceso: 17/09/2020.
- [3] Amir Vadiiee, Ambrose Doodoo, Leif Gustavsson. A comparison between four dynamic energy modelling tools for simulation of space heating demand of buildings.
- [4] Ambrose Doodoo, Uniben Yao Ayikoe Tettey, Leif Gustavsson. On input parameters, methods and assumptions for energy balance and retrofit analyses for residential buildings. *Energy and Buildings* 137 (2017) 76–89.
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.033>> Último acceso: 20/09/2020.
- [5] Ambrose Doodoo, Uniben Yao Ayikoe Tettey, Leif Gustavsson. Influence of simulation assumptions and input parameters on energy balance calculations of residential buildings. *Energy* 120 (2017) 718–730.
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.124>> Último acceso: 21/09/2020.
- [6] F Karlssona, P Rohdina, M-L Perssonb. Measured and predicted energy demand of a low energy building: important aspects when using Building Energy Simulation. *Building Serv. Eng. Res. Technol* 28,3 (2007) 223–235.
- [7] Drury B. Crawley, Linda K. Lawrie, Frederick C. Winkelmann, W.F. Buhl, Y. Joe Huang, Curtis O. Pedersen, Richard K. Strand, Richard J. Liesen, Daniel E. Fisher, Michael J. Witte, Jason Glazer. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings* 33 (2001) 319-331.
- [8] EnergyPlus. <<https://energyplus.net/>> Último acceso: 18/09/2020.
- [9] BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics). Department of Mechanical and Industrial Engineering, Building Systems Laboratory, University of Illinois, Urbana-Champaign, IL.
- [10] DOE2. <<http://www.doe2.com/>> Último acceso: 22/09/2020.
- [11] Drury B. Crawley, Jon W. Hand, Michaël Kummert, Brent T. Griffith. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment* 43 (2008) 661–673.



- [12] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Guía técnica Procedimientos y aspectos de la simulación de instalaciones térmicas en edificios. <<https://www.idae.es/tecnologias/eficiencia-energetica/edificacion/reglamento-de-instalaciones-termicas-de-los-0>> Último acceso: 22/09/2020.
- [13] Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC). <<https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-recursos/menu-aplicaciones/282-herramienta-unificada-lider-calener.html>> Último acceso: 22/09/2020.
- [14] Google Sketchup. <<https://www.sketchup.com/es>> Último acceso: 23/09/2020.
- [15] TRNSYS3D. <<http://www.trnsys.com/features/suite-of-tools.php.html>> Último acceso: 23/09/2020.
- [16] Código Técnico de la Edificación. Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE). <<https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-ahorro-energia.html>> Último acceso: 23/09/2020.
- [17] SG SAVE (Open Studio). <<http://www.efinovatic.es/energyPlus/>> Último acceso: 23/09/2020.
- [18] Open Studio. <<https://www.openstudio.net/>> Último acceso: 18/09/2020.
- [19] Código Técnico de la Edificación. Catálogo Informático de Elementos Constructivos (CEC). <<https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-catalogo-informatico-elementos-constructivos.html>> Último acceso: 24/09/2020.
- [20] Tess Libraries. <<http://www.trnsys.com/tess-libraries/>> Último acceso: 27/09/2020.
- [21] EFICANZA S.A. <<https://www.eficanza.es/es/inicio>> Último acceso: 23/09/2020.
- [22] SACYL. Hospital Universitario de Burgos (HUBU). <<https://www.saludcastillayleon.es/CABurgos/es/complejo-hospitalario-burgos/hospital-universitario-burgos>> Último acceso: 17/09/2020.
- [23] CALENER-GT. <<https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/DocumentosReconocidos/Paginas/documentos-reconocidos-no-vigentes.aspx>> Último acceso: 18/09/2020.
- [24] CE3X. <<https://www.efinova.es/CE3X>> Último acceso: 24/09/2020.
- [25] Universidade do Minho. <<https://www.uminho.pt/PT>> Último acceso: 18/09/2020.



[26] IEA EBC Annex 75 - Cost-effective Building Renovation at District Level
Combining Energy Efficiency & Renewables. <<https://annex75.iea-ebc.org/>> Último
acceso: 18/09/2020.

CAPÍTULO 4

Discusión y resultados de la investigación



4.1. Resultado 1: Modelización energética de dependencias del Hospital Universitario de Burgos (HUBU).

Como se ha señalado en la “Introducción”, el grupo de investigación en Ingeniería Energética de la Universidad de Burgos, en cuyo seno se ha enmarcado la realización de esta Tesis, formalizó con la empresa EFICANZA S.A. [1] un contrato de I+D+i para la modelización energética del Hospital Universitario de Burgos (HUBU) [2] durante el período 2016-2020. La empresa EFICANZA S.A. es la adjudicataria de todos los servicios generales del HUBU, salvo el servicio sanitario.

La función del grupo investigador de la Universidad en este trabajo de consultoría de I+D+i era la validación e inter-comparación de la simulación energética del hospital, que la empresa EFICANZA S.A. realizaría con personal propio y con la ayuda de una empresa consultora externa. La metodología a seguir era la siguiente:

1. La empresa EFICANZA S.A. y la consultora realizarían una simulación del hospital mediante la herramienta de CALENER-GT [3], programa reconocido por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico como procedimiento general para la certificación energética de edificios.
2. La Universidad realizaría una simulación de un número limitado de locales del hospital con una herramienta diferente, en este caso TRNSYS® [4] y otros programas complementarios, para comparar y validar el resultado obtenido globalmente para todo el hospital por la empresa.

El criterio ha sido siempre el de unificar lo máximo posible los datos de entrada que ambos equipos de trabajo, el de la empresa EFICANZA S.A. y el de la Universidad de Burgos, hemos utilizado, para poder hacer una comparación final de los resultados obtenidos con los dos programas de simulación energética empleados: CALENER-GT y TRNSYS®, respectivamente.

En este apartado voy a resumir el procedimiento empleado para la modelización energética del HUBU y el impacto de I+D+i a través de las publicaciones.

Mi contribución personal a este trabajo ha consistido en: (i) la modelización geométrica en tres dimensiones, la caracterización constructiva y la definición de las condiciones operacionales de una planta de consultas, tres plantas de hospitalización y una de quirófanos; (ii) la obtención de los resultados de demanda energética anual de estos espacios, así como en periodos menores, y también la de otras variables de control.

4.1.1. Descripción general del HUBU.

EL Hospital Universitario de Burgos (HUBU) [2] comenzó a funcionar el 18 de junio de 2012 como hospital público de referencia en la ciudad de Burgos. Está situado al Norte de la ciudad en una gran parcela a media ladera, como se puede ver en la (Figura 1).



Figura 1: Hospital Universitario de Burgos – HUBU

El HUBU consta de más de 4.000 locales con diferentes usos distribuidos en varios edificios de hasta once alturas, y tiene una superficie construida de unos 180.000 m², lo que le convierte en el hospital más grande de Castilla y León.

El Sótano -3, con aproximadamente 1 km de longitud, conecta la zona industrial (parte izquierda) con la zona administrativa y hospitalaria (zona derecha). Su acceso está restringido al personal autorizado.

La zona industrial consta de varios pabellones para la generación de los distintos tipos de energía requeridos y para la recepción de los distintos suministros, así como las zonas técnicas de mantenimiento, las cocinas y la lavandería.

Las edificaciones situadas a la derecha constan de los Sótanos -2 y -1 y de la Planta Baja. Tienen planta rectangular en forma de peine con patios interiores para aportar iluminación natural. Allí se sitúa la recepción, los quirófanos, las consultas, las áreas de radiología y las urgencias, como elementos más destacables. Arquitectónicamente, destaca el hall de entrada en forma de atrio cúbico de varias alturas, y el salón de actos. También dispone de varios aparcamientos cubiertos y en superficies.

Desde la planta baja, se alcanzan cinco bloques rectangulares de ocho alturas, siendo el situado más a la izquierda para uso administrativo, y los otros cuatro para uso de hospitalización y consultas.

Para finalizar este apartado haciéndose una idea global de la ocupación y equipamiento del HUBU que influye en sus demandas y consumos energéticos, en las (Tablas 1-3) muestro los principales recursos de los que está dotado.

RECURSOS INSTALADOS	NÚMERO
Camas hospitalización	677
Cunas neonatos	23
Camas UCI (Adultos, coronarios, pediátricos)	44
Locales de consulta / exploración	278
Hospital de día (puestos)	97
Paritorios	8
Quirófanos	24
Reanimación (puestos)	39
Diálisis (puestos)	40

Tabla 1: Recursos instalados en el HUBU

EQUIPOS DE ALTA TECNOLOGÍA	NÚMERO DE SALAS
Resonancia magnética	2
TAC	3
Telemando digital	1
Telemando multifunción	1
Radiología convencional	5
Ecografía	6
Mamografía	3
Exterotasia	1
Ortopantomógrafo	1
Densimetría ósea	1
Angiografía vascular	1
TAC intraoperatorio (neurocirugía)	1
Gamma cámara (medicina nuclear)	2
Tratamientos metabólicos (medicina nuclear)	2
Hemodinámica	2
Electrofisiología (hemodinámica)	1

Tabla 2: Salas de equipos de alta tecnología instalados en el HUBU

EQUIPOS DE ALTA TECNOLOGÍA	NÚMERO
Aceleradores lineales (radioterapia)	2
TAC simulador (radioterapia)	1

Tabla 3: Equipos de alta tecnología instalados en el HUBU



4.1.2. Definición geométrica.

De acuerdo con el personal técnico de EFICANZA S.A. [1], he realizado para cada planta distintas simplificaciones a partir de sus planos de distribución realizados con *AutoCad* [5]. Como principal condicionante, cabe recordar el hecho de que con *TRNSYS*® [4] no se pueden definir zonas térmicas cóncavas. Esto ha supuesto crear más subzonas o *airnodes* en todas las plantas, y luego unirlos con paredes virtuales.

A continuación, muestro las simplificaciones realizadas para poder generar en tres dimensiones los modelos de las plantas: CHB.P1, CHB.P3, CHB.P5, CHB.P7 y BTC.P0, en las (Figuras 2-4). Las tres plantas de hospitalización: CHB.P3, CHB.P5 y CHB.P7 tienen la misma distribución, por lo que se muestra una sola vez.

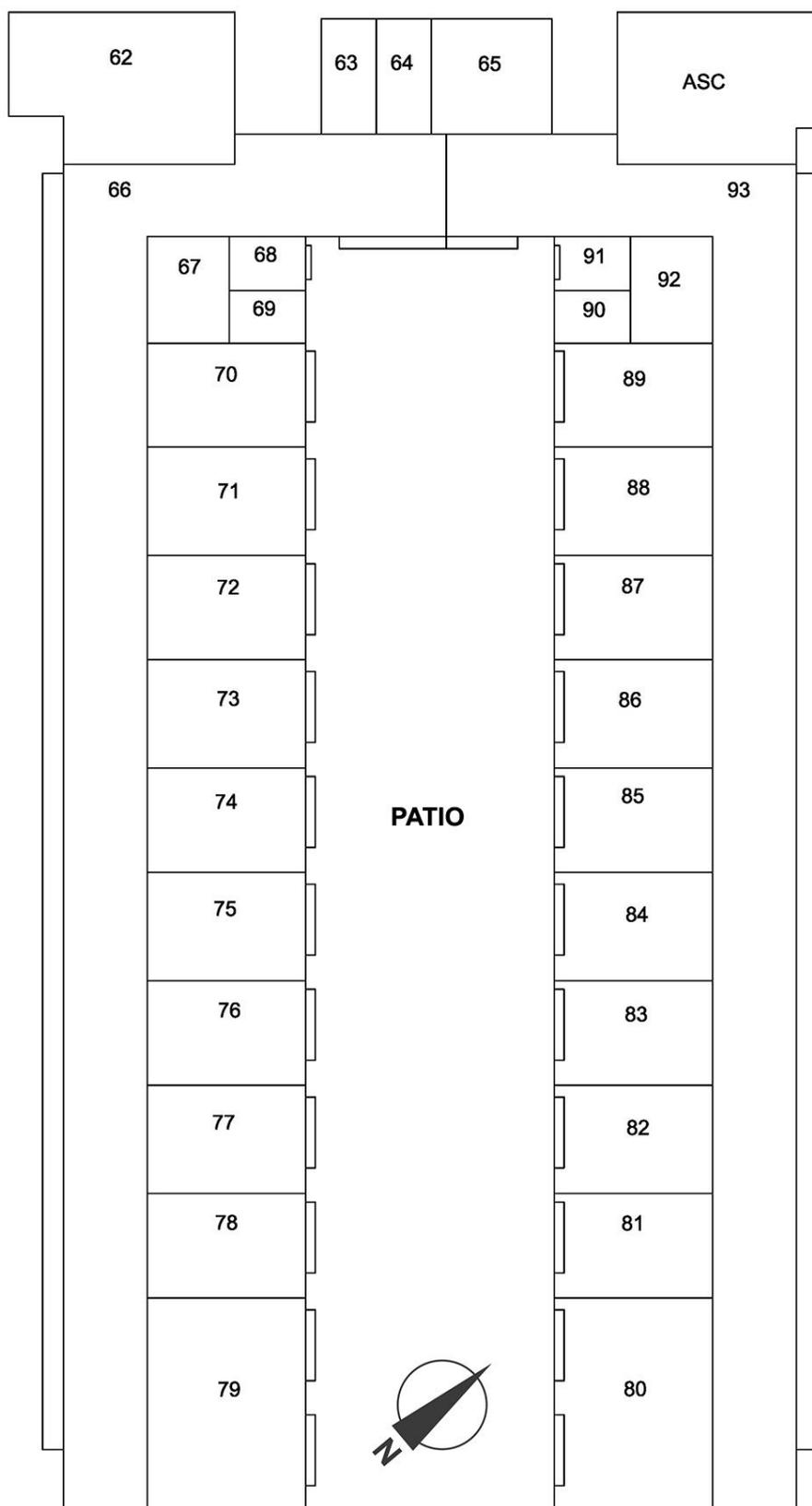


Figura 2: Simplificaciones de la planta de consultas

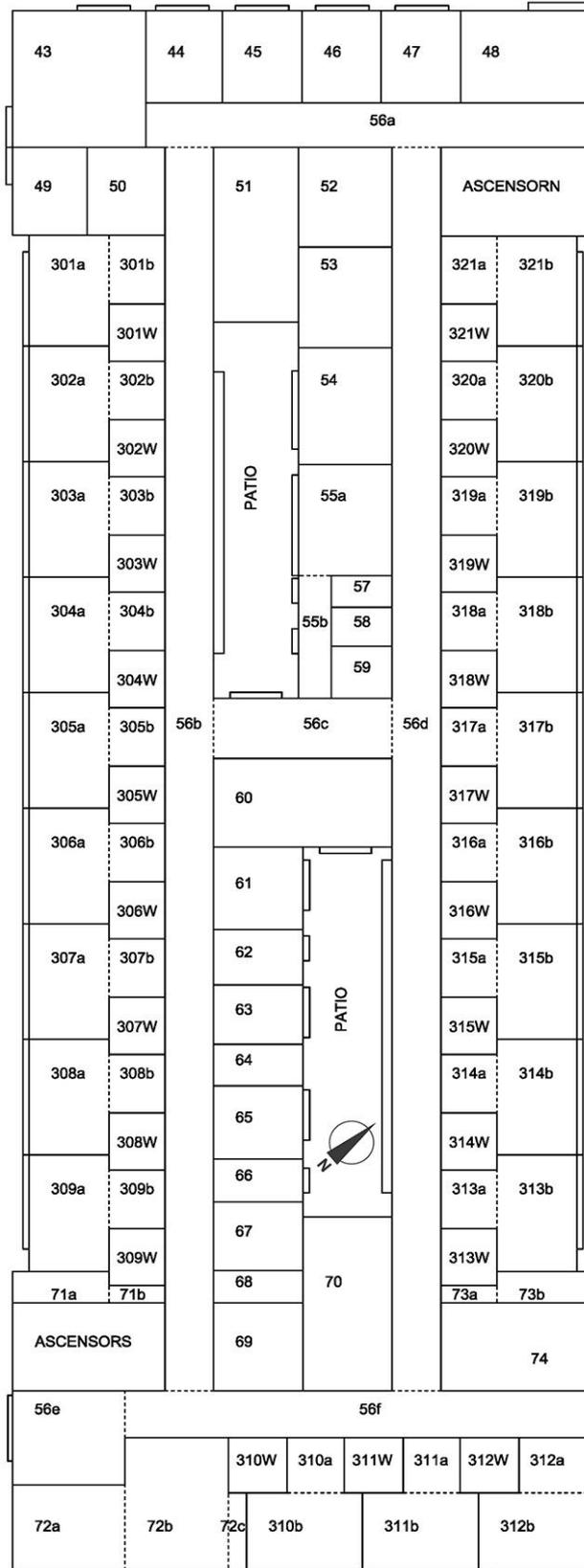


Figura 3: Simplificaciones de las plantas de hospitalización

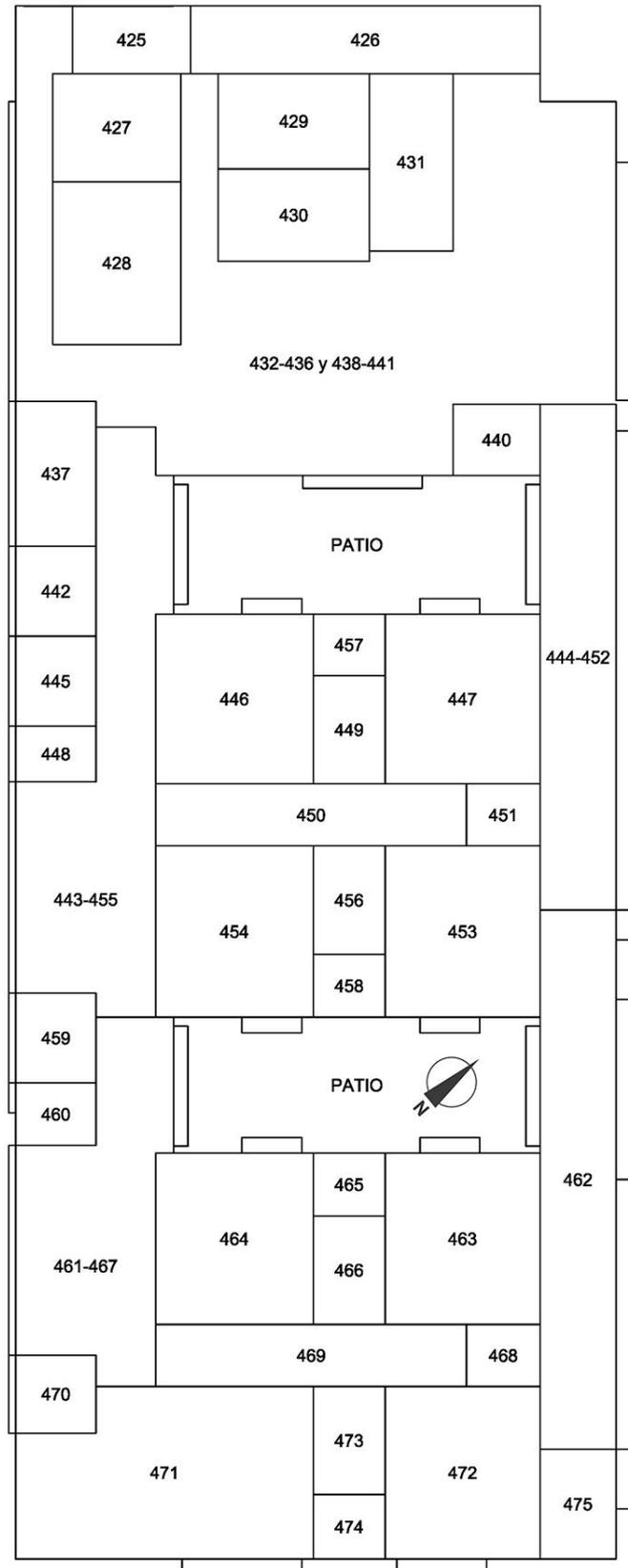


Figura 4: Simplificaciones de la planta de quirófanos

En las (Figuras 5-7) se puede ver el resultado de dichas modelizaciones. En representación de las tres plantas de hospitalización que son iguales, muestro la planta CHB.P7. Los elementos que aparecen en color morado corresponden a objetos de sombra del propio HUBU [2] que pueden interferir la radiación solar recibida por cada una de las plantas modelizadas, y su influencia es determinante.

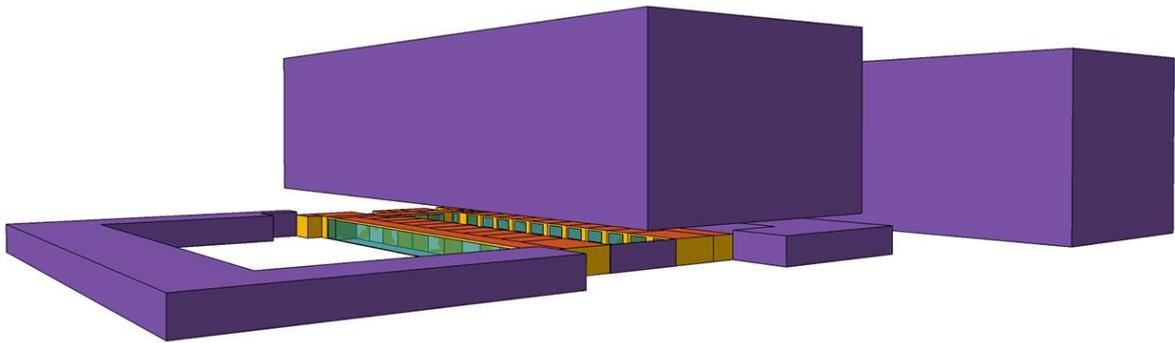


Figura 5: Modelización en 3D de la planta CHB.P1 de consultas

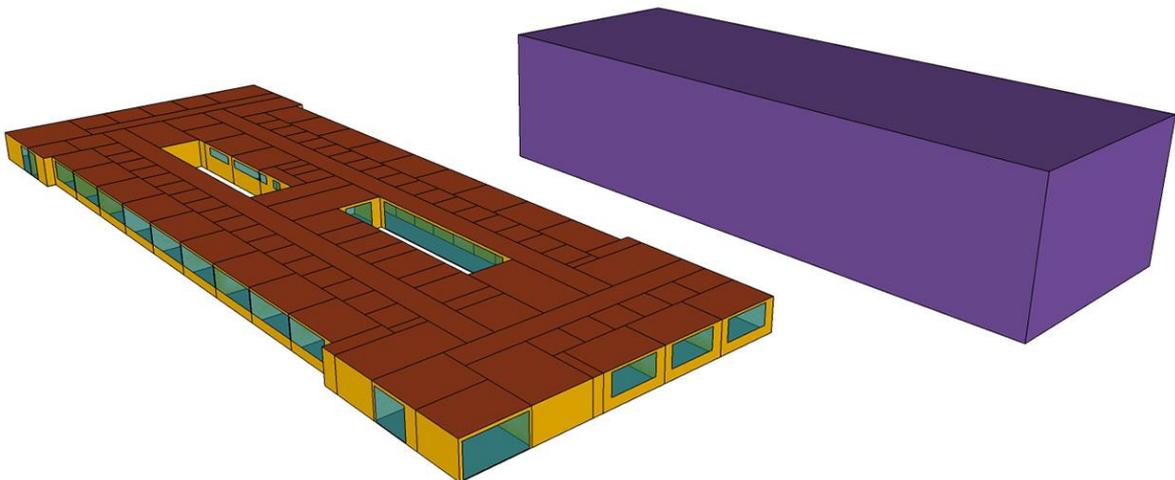


Figura 6: Modelización en 3D de la planta CHB.P7 de hospitalización

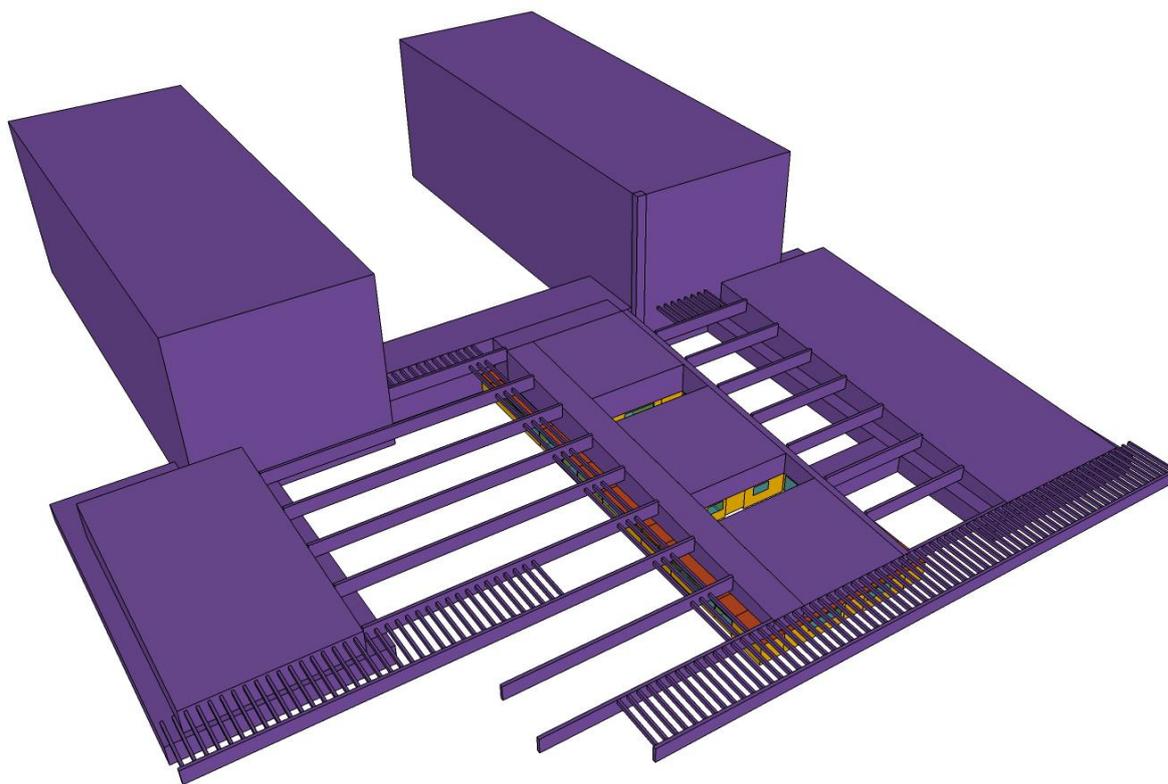


Figura 7: Modelización en 3D de la planta BTC.P0 de quirófanos

4.1.3. Descripción constructiva.

El proyecto de construcción del HUBU [2] es anterior a la entrada en vigor de la primera versión del Código Técnico de la Edificación (CTE) en 2006 [6], que es el marco normativo que establece las exigencias que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad establecidos en la LOE [7]. Por ello, los requisitos en materia energética para dicho proyecto eran los establecidos por la NBE-CT-79 [8] en cuanto a la envolvente térmica, y por el RITE de 1998 [9] en cuanto a las instalaciones térmicas. No obstante, los autores del proyecto de ejecución del hospital quisieron ir más allá de las exigencias del momento, y algunos valores de los elementos de la envolvente térmica son equiparables a las exigencias de la actual versión del año 2019 del Documento Básico de Ahorro de Energía DB-HE del CTE [10].

Para obtener los datos constructivos capa a capa de todos los cerramientos y particiones interiores del HUBU, en colaboración con el personal técnico de EFICANZA S.A. [1], he identificado cada material existente en el edificio con aquel del Catálogo Informático de Elementos Constructivos (CEC) [11] al que más se le parece. Este recurso del Código Técnico de la Edificación (CTE) [12] es un catálogo

informático de elementos constructivos que proporciona a los usuarios una base de datos que recoge información de las características de los materiales, de las prestaciones higrotérmicas y acústicas de los elementos constructivos genéricos y de las especificidades constructivas relativas a las exigencias básicas del CTE. Esta base de datos está integrada en la Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC) [13] que a su vez está vinculada al programa CALENER-GT [3].

En la (Tabla 4) muestro las magnitudes físicas, y sus unidades de medida, necesarias para definir las características de los materiales de construcción con los dos programas informáticos, cuyas bases de datos de materiales son incompatibles. La resistencia térmica se emplea solamente para definir los materiales no masivos, como las cámaras de aire.

MAGNITUD	HULC Y CALENER-GT	TRNSYS
Espesor	m	m
Conductividad	W/mK	kJ/hmK
Densidad	kg/m ³	kg/m ³
Calor específico	J/kgK	kJ/kgK
Resistencia térmica	m ² K/W	hm ² K/kJ

Tabla 4: Magnitudes físicas de los materiales de construcción

Los huecos de los cerramientos exteriores están formados por distintas composiciones de carpintería metálica y vidrios, que están caracterizados por las magnitudes que figuran en la (Tabla 5).

MAGNITUD	HULC Y CALENER-GT	TRNSYS
Transmitancia térmica del vidrio	W/m ² K	kJ/hm ² K
Factor solar del vidrio	Adimensional	Adimensional
Transmitancia térmica del marco	W/m ² K	kJ/hm ² K
Absortividad solar del marco	Adimensional	Adimensional
Fracción de marco	%	%

Tabla 5: Magnitudes físicas de las carpinterías exteriores

También he definido todos los tipos de puentes térmicos existentes por su transmitancia térmica lineal (Ψ , W/mK), y las longitudes de cada uno de ellos que hay en cada zona térmica del edificio.

4.1.4. Definición operacional.

El personal técnico de EFICANZA S.A. [1], que tiene datos monitorizados de la ocupación y de la utilización de las distintas instalaciones del HUBU [2], que también están inventariadas, me ha facilitado para cada zona térmica de cada una de las plantas modelizadas los siguientes datos:

- Horario de utilización durante todo un año.
- Cargas internas de ocupación sensible.
- Cargas internas de ocupación latente.
- Cargas internas debidas a la iluminación.
- Cargas internas debidas a los equipos.

Teniendo en cuenta estos datos, yo he generado los horarios y perfiles de uso adaptados al formato diferente que exige TRNSYS® [4].

4.1.5. Archivos meteorológicos.

El edificio del HUBU [2] está situado en la ciudad de Burgos, al Norte de España. Su latitud es 42°17'10" Norte y su longitud es 3°27'22" Oeste. Su altitud sobre el nivel del mar es de 861 metros. Esta ciudad tiene uno de los climas de invierno más severos en España.

El programa CALENER-GT [3] utiliza archivos climatológicos (*.bin) con datos desglosados para las 8760 horas que tiene un año, pero contiene menos variables para el estudio de la radiación solar que los archivos (*.tmy2) que emplea TRNSYS® [4], que en este aspecto es el programa más potente que existe en el mercado. Ambos archivos son incompatibles.

4.1.6. Definición de las instalaciones.

Esta parte de la simulación energética del HUBU [2] ha sido llevada a cabo íntegramente por mis compañeros del grupo de investigación de la Universidad de Burgos en Ingeniería Energética.

Para ello se han servido de las *Tess Libraries* [14], que están formadas por más de quinientos componentes de instalaciones para su uso en TRNSYS® [4]. Dichos modelos son parametrizables y adaptables a la realidad del modelo existente en el edificio, e incluyen el código fuente para poder realizar cambios. También es posible para el usuario avanzado programar desde cero nuevos elementos para estas librerías. Por ejemplo, es lo que ha sido necesario hacer con los inductores que fueron

fabricados a medida para el HUBU y por ello no disponen de información técnica suficiente. Ha habido que definirlos acudiendo a datos tomados *in situ*, a las características de equipos comerciales similares y al empleo de tablas y diagramas psicrométricos.

Por último, quiero mostrar en la (Figura 8) la modelización hecha con TRNSYS® de la planta CHB.P3 de hospitalización para dejar patente la complejidad del trabajo realizado sólo para una de las plantas del HUBU.

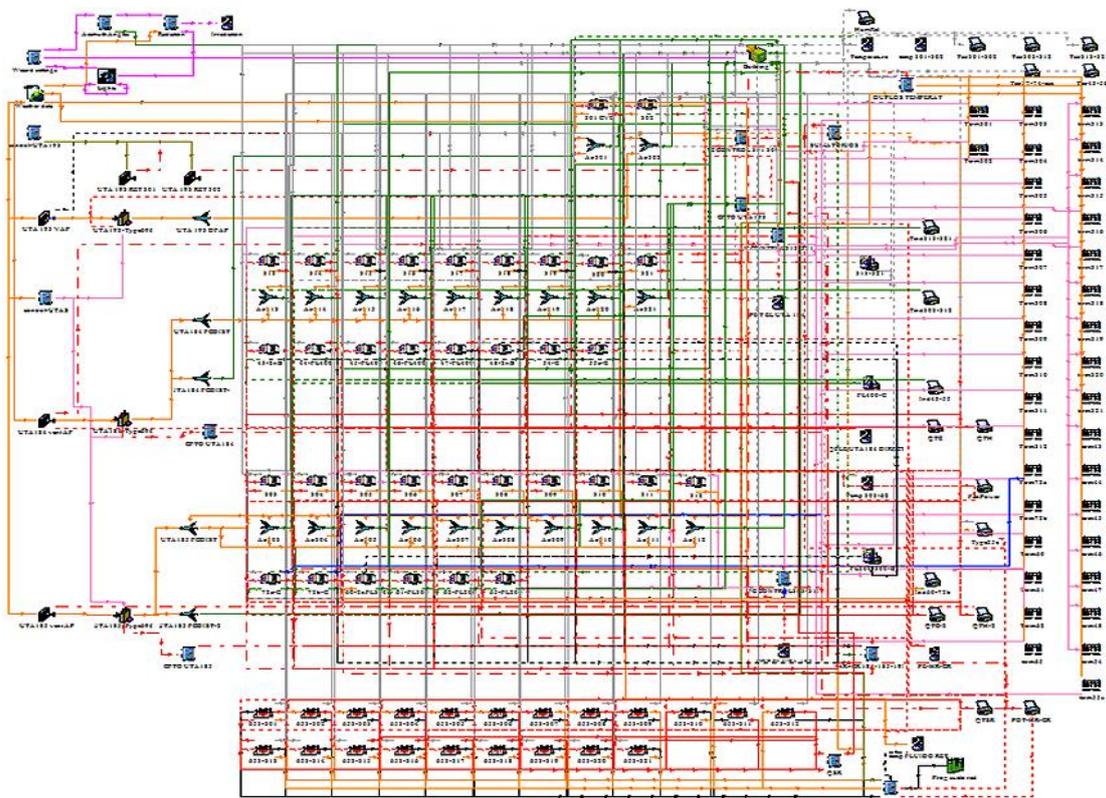


Figura 8: Modelización completa de la planta CHB.P3 de hospitalización

4.1.7. El problema surgido con el acoplamiento térmico de espacios adyacentes.

Como ya he expuesto anteriormente, TRNSYS® [4] tiene una limitación que impide dibujar espacios cóncavos. Así, los espacios con esta forma que con CALENER-GT [3] se pueden dibujar de una sola vez, con TRNSYS® se han tenido que dividir en dos o más rectángulos, como se puede ver en la (Figura 10). En estos casos, aparece una pared extra que según los manuales de TRNSYS® no influye en los cálculos, pues se define como un cerramiento virtual que desaparecerá a la hora de hacer la definición constructiva. Es un recurso necesario para la definición gráfica, pero a la hora de

asignar las características constructivas no se tiene en cuenta, por lo que no es un factor de discrepancia respecto a la modelización con CALENER-GT.

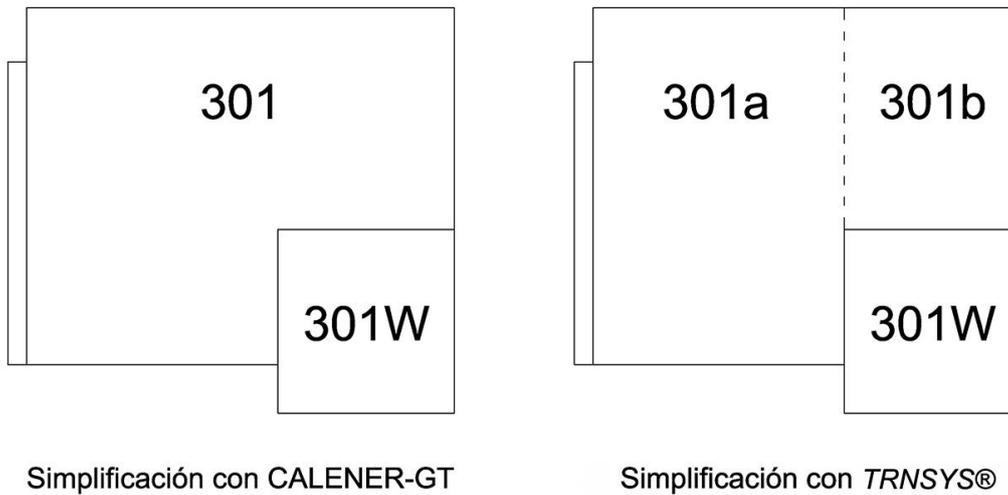


Figura 10: Simplificaciones de la habitación 301

Durante los trabajos de modelización energética, decidí hacer una prueba de control de las temperaturas interiores de algunos espacios representativos, especialmente, de aquellos que habían tenido que ser divididos con paredes virtuales. Si es cierto que las paredes virtuales son meros elementos auxiliares, no deberían influir en que dos partes de un mismo espacio tengan temperaturas interiores diferentes. Pero el resultado, no pudo ser más sorprendente, como se puede ver en la (Figura 11). Es una captura de pantalla de los resultados de simular horariamente durante un año la habitación 301 de la planta de hospitalización CHB.P3, sin temperaturas de consigna marcadas, de modo que las temperaturas interiores puedan oscilar libremente al no estar funcionando las instalaciones. En color rojo, está representada la temperatura ambiente exterior de Burgos, en color magenta, la temperatura del aire interior de la parte delantera y más grande de la habitación (301a), que tiene fachada y ventana al exterior, y en color azul oscuro, la temperatura del aire interior de la parte trasera y más pequeña de la habitación (301b), que no tiene cerramientos hacia el exterior.

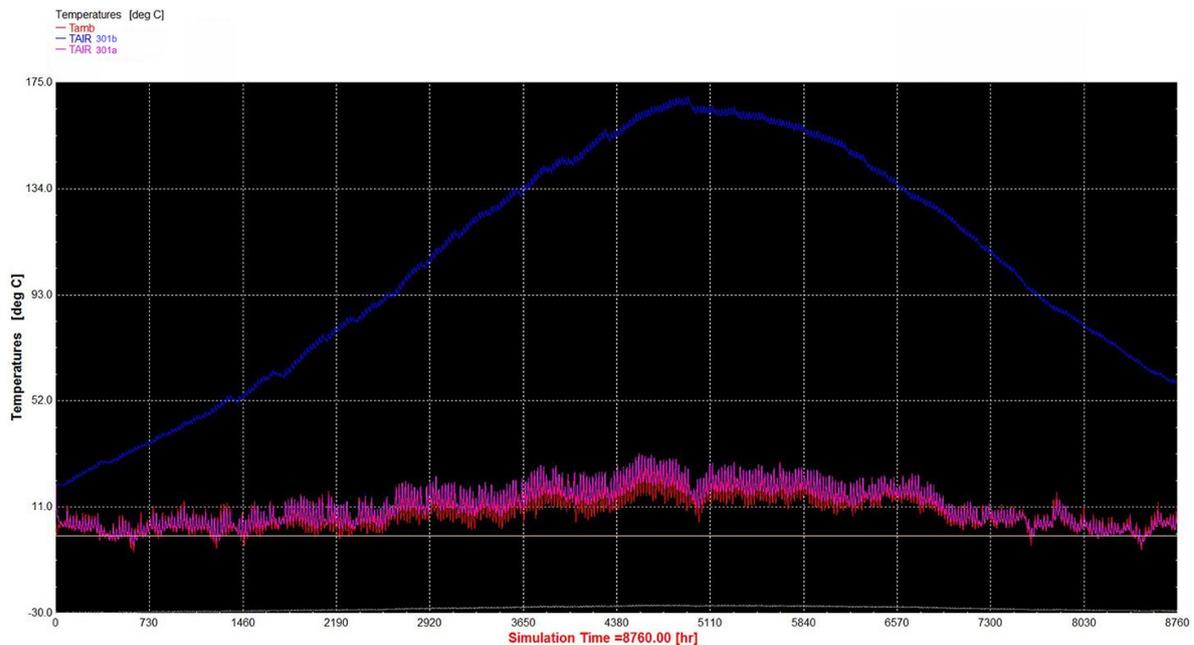


Figura 11: Divergencia de las temperaturas interiores de la habitación 301

Se observa que la temperatura del aire interior de la parte exterior de la habitación (301a) sigue las oscilaciones de la temperatura ambiente exterior, y las diferencias se deben al aislamiento térmico que proporciona la envolvente exterior. Pero la temperatura del aire interior de la parte interior de la habitación (301b) se va acumulando estacionalmente hasta llegar a valores imposibles cercanos a los 175 °C en verano, para ir descendiendo hacia el final del año. Son siempre temperaturas muy altas, muy diferentes de las de la parte exterior de la habitación, y que además no siguen en ningún momento las oscilaciones propias de la temperatura ambiente exterior.

Estos resultados me hicieron pensar que las paredes virtuales, en contra de lo que dicen los manuales de *TRNSYS*®, sí que tienen influencia en el comportamiento térmico de los espacios adyacentes que separan, como se puede ver en las temperaturas tan dispares. Además, en el momento en que se asignen temperaturas de consigna y se pongan en funcionamiento las instalaciones de climatización, se traducirá en demandas y consumos energéticos irreales.

Tras una búsqueda en la literatura científica [16-17] y una nueva revisión de los manuales de *TRNSYS*®, encontré una nueva posibilidad que hacía falta ensayar. Se basa en el establecimiento de un flujo de aire forzado entre las distintas partes que forman un espacio y que están divididas por paredes virtuales. Así, y sin el empleo de ninguna instalación de ventilación y por ello, sin generar ningún consumo energético

extra, se declara el establecimiento de un flujo de aire interior de una parte del espacio a otra, pudiendo ser este flujo pasante o de recirculación.

TRNSYS® crea siempre por defecto cada zona térmica dibujada en tres dimensiones con un solo *airnode*, aunque una zona puede tener más de un *airnode*, por ejemplo, para dividir un gran atrio en varios espacios superpuestos y separados por cerramientos virtuales horizontales, para poder definir diferentes condiciones de temperatura interior en cada uno de ellos.

Al dibujar la habitación 301 necesariamente como dos zonas térmicas contiguas con un *airnode* cada una, lo primero que he tenido que hacer desde *TRNBuild* [15] es convertirlas en una sola zona térmica con dos *airnodes*. Para ello, hay que elegir qué zona va a permanecer, en este caso la (301a), y luego mover el *airnode* desde la zona (301b) a la (301a). Como consecuencia de esta acción, la habitación 301 quedará representada por una zona térmica (301a) con dos *airnodes*: [301a] y [301b].

Seguidamente, he indicado que el mismo caudal de flujo de aire (kg/h) es enviado y es recibido entre los dos *airnodes*. He hecho simulaciones con diferentes caudales: 0, 10, 100, 500, 1.000, 1.500 y 2.000 kg/h, y he podido sacar estas conclusiones:

- El sentido del flujo del aire en los acoplamientos entre dos *airnodes* no influye en las demandas energéticas de calefacción y de refrigeración, ni en las temperaturas del aire de cada uno de ellos.
- Se obtienen resultados de temperaturas del aire más coherentes, si se establecen acoplamientos de ida y vuelta, es decir, que todos los *airnodes* manden a otro una cantidad, y reciban a su vez esa misma cantidad, bien del *airnode* al que se la han mandado, o de un tercero si se hace un acoplamiento enlazado.
- Las demandas de calefacción y de refrigeración disminuyen a medida que aumenta el flujo de aire intercambiado, tendiendo a estabilizarse a partir de los 500 kg/h. Además, se establece una coherencia entre las temperaturas del aire interior de los dos *airnodes* tal y como se puede apreciar en la (Figura 12), en contraste con lo que aparecía en la (Figura 11).
- Una pared virtual entre dos *airnodes* es transparente a la radiación solar, pero no permite transferencia de calor entre ambos, y por eso se producía el sobrecalentamiento en el *airnode* interior [301b] cuando no había intercambio de aire.
- Una pared virtual entre dos zonas térmicas es opaca a la radiación solar y tampoco permite la transferencia de calor entre ambas.

Para contrastar estos resultados, he modelizado también un espacio de forma rectangular y de igual volumen que la habitación 301, de modo que ha podido ser simulado como una única zona térmica con un único *airnode*, al no presentar concavidades, y también dividiéndolo con una pared virtual e incorporando diferentes flujos de intercambio de aire. Así, he podido obtener resultados más fiables para calibrar los de la habitación.

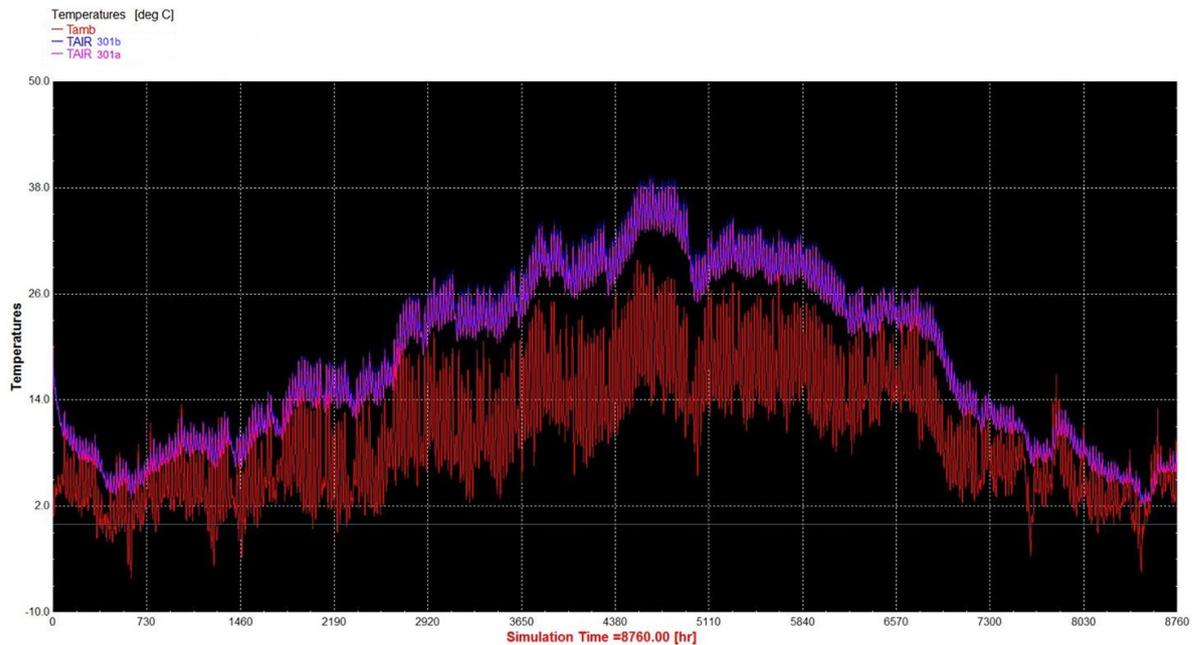


Figura 12: Convergencia de las temperaturas interiores de la habitación 301

Por tanto, este trabajo constituye una novedad significativa en la utilización de *TRNSYS*® [4] para la definición térmica de espacios geoméricamente cóncavos, que permite más precisión y coherencia en los resultados obtenidos de la simulación.

Este trabajo de investigación realizado ha dado lugar a esta publicación:

- Raúl Briones-Llorente, Fernando Feijoo and Eduardo Montero. ***Thermal coherence of concave spaces formed by various airnodes with coupling by means of TRNSYS***. 14th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, celebrada en Wicklow (Irlanda) del 22 al 24 de julio de 2019.

Esta publicación figura en el “Anexo 1” de esta Tesis Doctoral.

4.2. Resultado 2: Estudio del comportamiento energético de nuevos materiales de construcción que incorporan elementos reciclados.

Uno de los objetivos de esta Tesis es la optimización de la demanda energética de los edificios a partir de nuevos materiales eficientes respetuosos con el medio ambiente y el desarrollo sostenible.

En la Universidad de Burgos, el Grupo de Investigación de Ingeniería de la Edificación trabaja en el diseño de nuevos materiales sostenibles, circunstancia que aporta un valor añadido a los propósitos de esta Tesis Doctoral. Para ello, comencé a colaborar con los investigadores del grupo estudiando las prestaciones de mejora energética de los materiales objeto de su investigación.

Una de las líneas de investigación que tiene este grupo es la Investigación y Diseño de Nuevos Materiales para Edificación y Obra Civil, como morteros y hormigones, utilizando en su dosificación residuos industriales y de edificación valorizados. Los residuos industriales utilizados en las investigaciones son, entre otros, diferentes tipos de espumas rígidas de poliuretano y escorias de acería, tanto de la Metalurgia Primaria (escorias negras) como de la Metalurgia Secundaria (escorias blancas).

Esta estrategia investigadora es una apuesta clara por reducir la dependencia de las materias primas tradicionales, buscando en el reciclaje y la valoración de residuos una alternativa válida para el progreso industrial y científico, dentro del nuevo concepto de economía circular.

Este planteamiento basado en la sostenibilidad de los materiales de construcción complementa perfectamente al del estudio y mejora de la eficiencia energética de los edificios mediante el empleo de técnicas de simulación avanzadas. Se trata, en definitiva, de conseguir edificios más sostenibles durante todo su ciclo de vida, haciendo especial énfasis en dos etapas:

- Reducción del consumo de materias primas con el empleo de materiales reciclados, lo que implica, además, una reducción del volumen de residuos generados, de la energía primaria, y de las emisiones de CO₂ debidas a su producción.
- Reducción del consumo de energía primaria y las emisiones de CO₂ durante el periodo de explotación de los edificios, gracias al conocimiento de su comportamiento energético mediante técnicas de simulación, con el objeto de

elaborar propuestas de mejora con medidas que afecten a la envolvente térmica, a las instalaciones y al programa de usos.

Estos objetivos están totalmente alineados con la normativa internacional más ambiciosa de cara a la mitigación y la adaptación al cambio climático, como es la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible aprobada por la Asamblea General de las Naciones Unidas [18]. Se trata de un plan de acción a favor de las personas, el planeta y la prosperidad, que también tiene la intención de fortalecer la paz universal y el acceso a la justicia. Está estructurado en torno a 17 Objetivos (Figura 13) con 169 metas de carácter integrado e indivisible que abarcan las esferas económica, social y ambiental. Estos objetivos han sido plasmados en la legislación española a través de la Agenda 2030 [19].



Figura 13: 17 Objetivos de desarrollo sostenible

Las líneas de investigación abordadas en esta Tesis Doctoral encajarían con los siguientes objetivos:

- **3 – Salud y bienestar:** reducir los costes operativos de un hospital mediante la apuesta por la eficiencia energética ayuda a mantener el carácter universal, público y gratuito del sistema sanitario, así como a garantizar su sostenibilidad al disponer de más recursos económicos.
- **7 – Energía asequible y no contaminante:** Reducir el consumo energético de los edificios contribuye a garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todas las personas, ya que no es un bien ilimitado.
- **11 – Ciudades y comunidades sostenibles:** El empleo de materiales de construcción reciclados y el aumento de la eficiencia energética de los edificios



ayuda a reducir el impacto ambiental negativo de las ciudades, atendiendo especialmente a la calidad del aire y a la gestión de residuos.

- **12 – Producción y consumo responsables:** El empleo de materiales de construcción reciclados promueve el desarrollo sostenible mediante el uso eficiente de los recursos naturales, así como la reducción de la generación de residuos, y una apuesta clara por una economía circular.
- **13 – Acción por el clima:** El aumento de la eficiencia energética de los edificios y el uso de materiales reciclados, implica una doble reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que ayuda a mitigar el cambio climático.

Los integrantes del Grupo de Investigación de Ingeniería de Edificación trabajan diseñando nuevas dosificaciones de conglomerados que incorporan como agregados residuos industriales valorizados en su composición. Con estas mezclas se moldean probetas normalizadas para su estudio en el laboratorio, de acuerdo con los procedimientos de análisis y las prescripciones técnicas recogidas en la normativa de aplicación.

Una vez validado el material mediante ensayos de caracterización, tanto en estado fresco como endurecido, se estudia su durabilidad en situación de prestación, sometiendo los morteros a la acción de agentes agresivos externos. Superada esta fase, el material base se utiliza para construir prototipos prefabricados susceptibles de ser fabricados industrialmente e incorporados como nuevos materiales de construcción en los edificios, como, por ejemplo: bloques, ladrillos, paneles...

El propósito de estas investigaciones es conseguir materiales ecológicos, respetuosos con el medio ambiente, fabricados con productos reciclados valorizados y eficientes desde el punto de vista energético, en coherencia con lo dispuesto con la normativa europea sobre eficiencia energética y reciclado de residuos.

Estas investigaciones previas han permitido desarrollar un estudio completo de las prestaciones de los nuevos materiales prefabricados, obtenidos a partir de los morteros ecológicos diseñados con residuos valorizados, comprobando su influencia en las demandas térmicas de calefacción y refrigeración de los edificios, al incorporarlos como elementos integrantes de su envolvente, comprobando la mejora la inercia térmica y su comportamiento frente a la posible aparición de condensaciones superficiales e intersticiales en su estructura.

El objetivo de estos estudios era la comparación del comportamiento energético de nuevos materiales frente a los materiales convencionales, para asegurar el



cumplimiento de los códigos de construcción en vigor [12]. La contribución de la simulación energética al I+D+i del proyecto consiste en que ha permitido validar su utilización como sustitutos de otros elementos constructivos tradicionales en la edificación, ofreciendo prestaciones similares, manteniendo el criterio de no empeoramiento, y sumando los beneficios ambientales de la reutilización de residuos industriales, contribuyendo así a la economía circular y al desarrollo sostenible.

Mi contribución en este proyecto de I+D+i ha dado lugar a varios resultados.

Congresos:

- Raúl Briones, Fernando Aguilar, Ángel Rodríguez, Verónica Calderón and Eduardo Montero. **Study of the impact on energy demand due to the use of new opaque panels with recycled additives on curtain walls on an office building.** 31st International conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, celebrada en Guimarães (Portugal) del 17 al 21 de junio de 2018.
- Raúl Briones-Llorente, Eduardo A. Montero García, Verónica Calderón Carpintero, Sara Gutiérrez-González and Ángel Rodríguez Saíz. **Use of recycled industrial waste for the development of energy efficient and sustainable façade panels.** 13th Conference on Advanced Building Skins, celebrada en Bern (Suiza) del 1 al 2 de octubre de 2018.

Publicaciones indexadas:

- Raúl Briones-Llorente, Verónica Calderón, Sara Gutiérrez-González, Eduardo Montero and Ángel Rodríguez. **Testing of the Integrated Energy Behavior of Sustainable Improved Mortar Panels with Recycled Additives by Means of Energy Simulation.** *Sustainability*. 11(11):3117. Junio 2019. DOI: 10.3390/su11113117.
- Raúl Briones-Llorente, Ricardo Barbosa, Manuela Almeida, Eduardo Atanasio Montero García and Ángel Rodríguez Saíz. **Ecological Design of New Efficient Energy-Performance Construction Materials with Rigid Polyurethane Foam Waste.** *Polymers*. 2020, 12, 1048. Mayo 2020. DOI: 10.3390/polym12051048.

Las dos últimas publicaciones figuran, respectivamente, en el “**Anexo 2**” y en el “**Anexo 3**” de esta Tesis Doctoral.

4.3. Resultado 3: Estudio de coste-efectividad a nivel de distrito de medidas de eficiencia energética combinadas con energía renovable.

Durante mi periodo de estudiante de Doctorado he tenido la oportunidad de realizar una estancia internacional de investigación para mejorar mi formación científica y para poder obtener la “Mención de Doctorado Internacional”.

La estancia de investigación ha tenido una duración de cuatro meses, desde el 1 de octubre de 2019 hasta el 31 de enero de 2020. Se ha desarrollado en el CTAC (*Research Centre in Territory, Environment and Construction*) [20] de la *Universidade do Minho* [21], situado en el Campus de Azurém de la ciudad de *Guimarães*, en Portugal. Ha estado vinculada a mi participación en el proyecto *IEA EBC Annex 75 - Cost-effective Building Renovation at District Level Combining Energy Efficiency & Renewables* [22], de la Agencia Internacional de la Energía. En la actualidad, sigo colaborando en este proyecto de I+D+i.

4.3.1. IEA EBC Annex 75 - Cost-effective Building Renovation at District Level Combining Energy Efficiency & Renewables.

La transformación de los edificios existentes en edificios de bajas emisiones y de bajo consumo de energía es primordial en las ciudades, donde muchos edificios continúan dependiendo demasiado del uso de combustibles fósiles para sus instalaciones térmicas. Sin embargo, al mismo tiempo, existen oportunidades específicas para desarrollar y aprovechar soluciones a nivel de distrito a escala urbana.

En este contexto, el proyecto tiene como objetivo determinar la rentabilidad de varios enfoques que combinan medidas de mejora de la eficiencia energética y medidas de implementación de energía renovable a nivel de distrito, siendo una tarea compleja encontrar el equilibrio entre ambos tipos de actuaciones para el parque de edificios existente.

El objetivo es proporcionar orientación a los responsables políticos, a las empresas que trabajan en el campo de la transición energética, así como a los propietarios de edificios para transformar de manera rentable el actual modelo de uso de energía en el parque de edificios existentes en las ciudades hacia soluciones de bajas emisiones y bajo consumo de energía. Se proporcionará información, directrices, herramientas y recomendaciones precisas y comprensibles para ayudar a los responsables de la toma de decisiones de los sectores público y privado a elegir las mejores opciones que se apliquen a sus necesidades específicas.

Este proyecto se ha dividido en cuatro subtarefas principales a desarrollar por los distintos miembros participantes, que a su vez se han dividido en paquetes de trabajo. Está dirigido por la Profesora Manuela Almeida de la *Universidade do Minho* [21], y participan cuarenta y siete investigadores de universidades y centros de investigación de los siguientes países: Alemania, Austria, Bélgica, China, Dinamarca, España, Italia, Noruega, Países Bajos, Portugal, República Checa, Suecia y Suiza.

4.3.2. Descripción general del *Complexo Habitacional Picoto*.

Desde la *Universidade do Minho* [21] han seleccionado dos grupos de viviendas sociales públicas situados en la ciudad de *Braga* (Portugal): (i) *Barrio Social de Santa Tecla*; (ii) *Complexo Habitacional Picoto*. Esta característica facilitaría la obtención de documentación técnica y el acceso a las viviendas para recabar datos técnicos. Además, por su antigüedad y estado de conservación, son viviendas candidatas a un proyecto de mejora energética, entre otros aspectos.

Mi trabajo dentro del este proyecto se centró en la simulación energética del *Complexo Habitacional Picoto*, cuyas principales características son las siguientes:

- 50 viviendas unifamiliares adosadas de doble altura agrupadas en 7 bloques.
- Superficie habitable: 1.767,10 m².
- Fecha de construcción: 1990.

4.3.3. Definición geométrica.

El *Complexo Habitacional Picoto* consta de siete alineaciones de viviendas adosadas, organizadas de la siguiente manera (Figura 14):

- A1, A2, A3, A4 y A5: con seis viviendas cada una del tipo A.
- B1 y B2: con diez viviendas cada una del tipo B.
- Las viviendas tienen una mala calidad constructiva.
- El estado de conservación es de un nivel bajo y abundan las autoconstrucciones adosadas a las viviendas (Figura 15).
- Están encajadas junto a laderas muy verticales, con los riesgos que esto puede ocasionar, y siendo además elementos naturales que arrojarán sombra sobre las viviendas.



Figura 14: Vista aérea en planta del *Complejo Habitacional Picoto*



Figura 15: Estado de conservación

Tras analizar un reportaje fotográfico disponible y la escasa documentación gráfica existente, he dibujado nuevos planos de plantas y secciones de cada tipo de vivienda, con dimensiones coherentes entre sí, para poder generar posteriormente los modelos en tres dimensiones.

El proceso de simplificaciones para obtener las zonas térmicas a modelizar ha sido análogo al empleado en la modelización energética del Hospital Universitario de Burgos (HUBU) [2], pues, aunque aquí he utilizado el programa de simulación energética *SG SAVE (Open Studio)* [23], para la modelización en tres dimensiones se apoya en *Google Sketchup* [24], al igual que *TRNSYS®* [4].

En las (Figuras 16-22) muestro el aspecto terminado de cada una de las siete alineaciones de viviendas unifamiliares simuladas incluyendo los objetos de sombra externos, en color morado, que son los otros edificios y las laderas de las montañas próximas, que van a sombrear a las viviendas a lo largo del día influyendo en sus demandas energéticas.

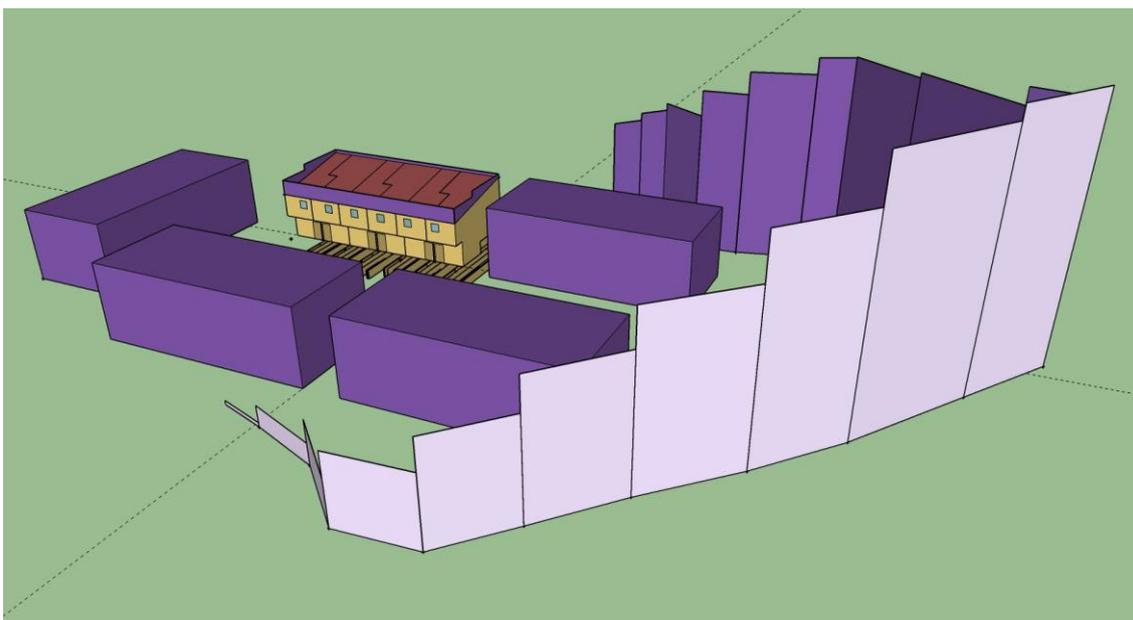


Figura 16: Simulación completa de las viviendas de la alineación A1



Figura 17: Simulación completa de las viviendas de la alineación A2



Figura 18: Simulación completa de las viviendas de la alineación A3

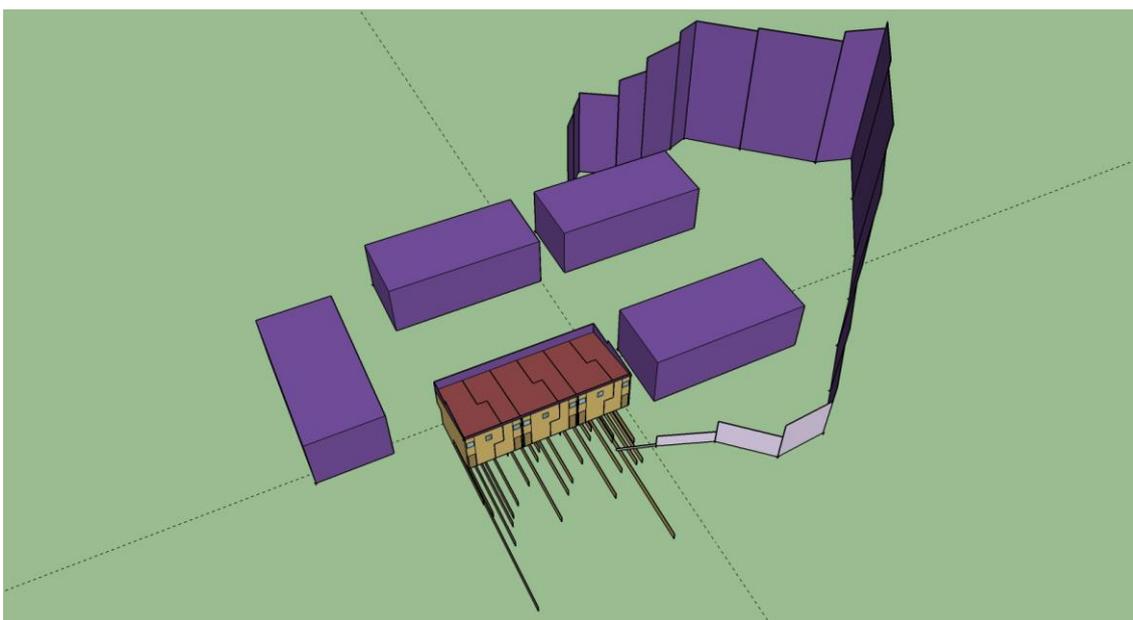


Figura 19: Simulación completa de las viviendas de la alineación A4

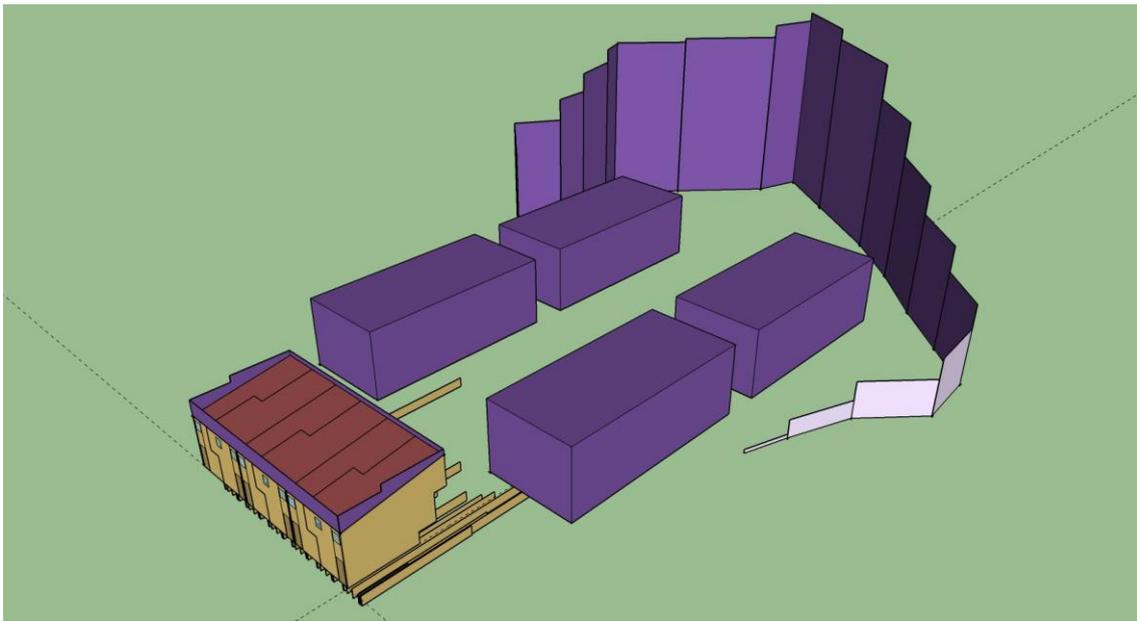


Figura 20: Simulación completa de las viviendas de la alineación A5

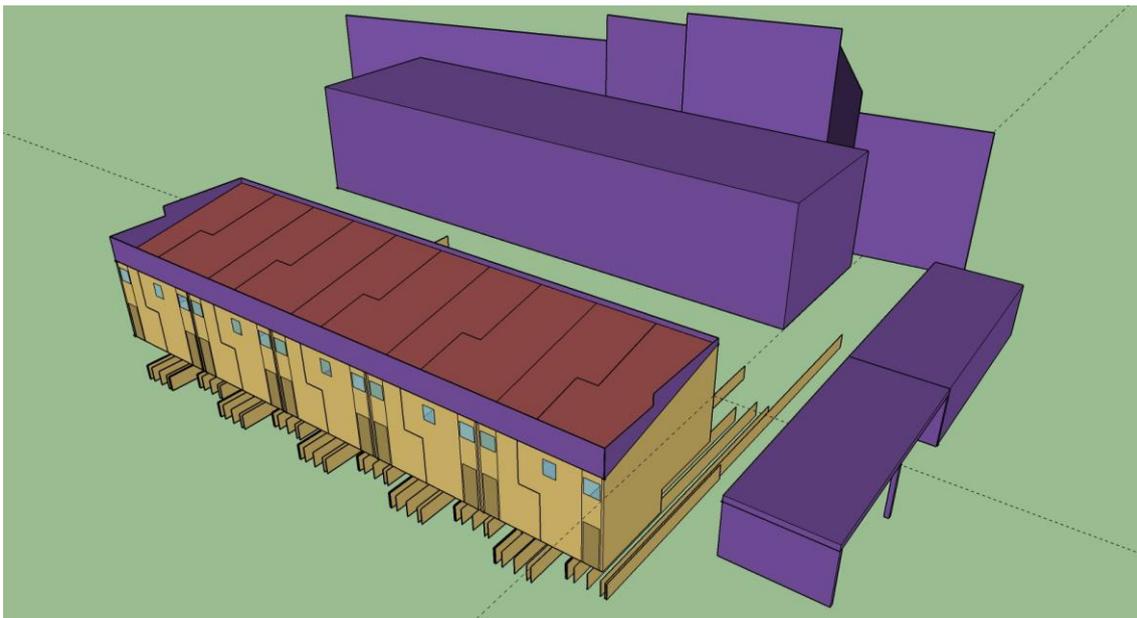


Figura 21: Simulación completa de las viviendas de la alineación B1



Figura 22: Simulación completa de las viviendas de la alineación B2

4.3.4. Descripción constructiva.

Tras el análisis detallado de la documentación existente, he identificado seis tipos de cerramientos exteriores y dos tipos de particiones interiores. En la sección representativa de la (Figura 23), cuya leyenda explico en la (Tabla 6), he representado los elementos de la envolvente térmica de las viviendas. Las fachadas tipos 1 y 2 están presentes formando paños a lo largo de todas ellas, siendo el tipo 1 el más predominante, y por eso las he representado en degradado.

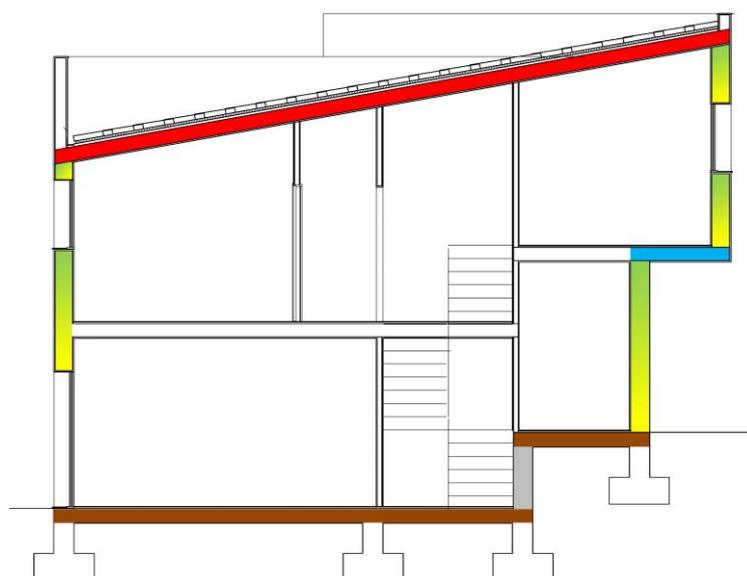


Figura 23: Sección constructiva representativa

COLOR	TIPO DE CERRAMIENTO EXTERNO
	Suelo sobre el terreno
	Suelo en voladizo
	Tejado inclinado
	Fachada tipo 1
	Fachada tipo 2
	Muro en contacto con el terreno

Tabla 6: Cerramientos de la envolvente térmica

Siguiendo un método análogo al empleado en la modelización energética del Hospital Universitario de Burgos (HUBU) [2], he identificado todas las capas de los materiales constructivos que forman cada cerramiento exterior y cada partición interior, así como los marcos y los vidrios de las carpinterías exteriores.

Para definir las propiedades termofísicas de dichos elementos constructivos estudié tres posibles métodos de acuerdo con el origen de los datos de partida, y de acuerdo con los profesores de la *Universidade do Minho* [21], optamos por utilizar una solución mixta:

- Normativa española: librería de materiales de *SG SAVE (Open Studio)* [23] acorde con el Catálogo Informático de Elementos Constructivos (CEC) [11] del Código Técnico de la Edificación (CTE) [12].
- Normativa portuguesa: utilizando sólo los valores de transmitancia térmica para conjuntos constructivos completos que figuran en el documento *ITE 50* [26] relativo a la eficiencia energética de los edificios, eligiendo aquellos más parecidos a los existentes en las viviendas de este proyecto. No se tendría en cuenta la composición por capas ni todas las propiedades termofísicas, ni tampoco se calcularía la inercia térmica.
- Solución mixta: extrayendo de [26] las únicas propiedades termofísicas que ofrece para cada material constructivo: (i) conductividad térmica; (ii) resistencia térmica; y, además, completando el resto de las propiedades desde [11]: (i) densidad; (ii) calor específico.

Además, he tenido en cuenta el color de la capa exterior de cada cerramiento y de los marcos de las carpinterías exteriores para calcular su absorptividad solar.

Para definir las carpinterías exteriores, también he considerado el factor solar del vidrio y la permeabilidad al aire exterior.

He identificado todos los tipos de puentes térmicos existentes en las viviendas, y he medido sus longitudes en los modelos en tres dimensiones realizados. Sus

transmitancias térmicas lineales las he calculado empleando la librería de puentes térmicos que está incluida en *SG SAVE (Open Studio)*, cuyos valores son acordes con el catálogo [11]. He tenido en cuenta su diseño constructivo, las transmitancias térmicas de los elementos constructivos incidentes y sus espesores. Influye especialmente la existencia, o no, de aislamiento térmico, su posición en el orden de las capas de los materiales constructivos, y si es continuo o si está interrumpido por otro material.

4.3.5. Definición operacional.

SG SAVE (Open Studio) [23] utiliza perfiles de uso de acuerdo con el Código Técnico de la Edificación (CTE) [12]. He elegido el perfil de uso residencial, pero adaptándolo desde *Open Studio* [25] a los valores de los horarios de temperaturas de consigna, ventilación y cargas internas propios de la normativa portuguesa, y que han sido facilitados por los profesores de la *Universidade do Minho* [21].

4.3.6. Archivos meteorológicos.

Como *SG SAVE (Open Studio)* [23] es un programa informático para verificar la normativa energética española, no incluye ficheros de ciudades portuguesas. Pero desde *Open Studio* [25] se accede a los ficheros meteorológicos disponibles para ciudades de todo el mundo.

No se dispone del fichero meteorológico correspondiente a la ciudad de *Braga*, por lo que de acuerdo con los profesores de la *Universidade do Minho* [21], optamos por utilizar el fichero de la cercana ciudad de *Porto*.

4.3.7. Definición de las instalaciones.

He calculado la demanda diaria de agua caliente sanitaria total de cada alineación de viviendas según la ocupación prevista, distinguiendo entre las viviendas de dos y tres dormitorios, teniendo en cuenta una demanda tipo de cuarenta litros por persona y día, según la normativa portuguesa. Para la producción de agua caliente sanitaria, cada vivienda dispone de un calentador sin acumulación alimentado por gas natural, con un rendimiento del 80,00 %. No hay aporte de energías renovables.

Las viviendas no disponen de ninguna instalación individual o colectiva, ni para calefacción, ni para refrigeración. Las necesidades de calefacción se satisfacen utilizando radiadores eléctricos a voluntad de los usuarios. En estos casos, para hacer las simulaciones energéticas de los edificios se emplean los llamados sistemas virtuales de climatización, que permiten llevar a cabo la simulación y ofrecen unos

resultados de demandas y consumos bastante conservadores, pero comparables con los resultados obtenidos en otros edificios en iguales circunstancias. Los profesores de la *Universidade do Minho* [21] me han facilitado los valores que se utilizan para definir estos sistemas virtuales de acuerdo con la normativa portuguesa:

- Sistema virtual de calefacción eléctrico, con un rendimiento del 100 %.
- Sistema virtual de refrigeración eléctrico, con un rendimiento del 300 %, que fue cambiado al 100 % para obtener las demandas energéticas relativas a equipos con el mismo rendimiento. Posteriormente, siempre cabe la posibilidad de aplicar un coeficiente corrector a las demandas obtenidas si se quiere considerar un rendimiento diferente.

4.3.8. Resultados del caso de referencia.

He realizado por separado las siete simulaciones energéticas anuales con base horaria para cada una de las siete alineaciones de viviendas en su estado actual. En la (Tabla 7) muestro los resultados obtenidos para las demandas energéticas de calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria, respectivamente, tanto con valores totales anuales, como con los valores normalizados por la superficie habitable acondicionada.

CASO DE REFERENCIA	SUPERFICIE (m ²)	DEMANDAS ENERGÉTICAS TOTALES [kWh/(m ² año)]			DEMANDAS ENERGÉTICAS TOTALES (kWh/año)		
		CALEFACCIÓN	REFRIGERACIÓN	ACS	CALEFACCIÓN	REFRIGERACIÓN	ACS
A1	211,90	182,56	5,25	30,48	38.684,46	1.112,48	6.458,71
A2	211,90	185,24	4,16	30,48	39.252,36	881,50	6.458,71
A3	211,90	194,02	0,12	30,48	41.112,84	25,43	6.458,71
A4	211,90	189,24	1,90	30,48	40.099,96	402,61	6.458,71
A5	211,50	154,57	13,56	30,56	32.691,56	2.867,94	6.463,44
B1	354,00	135,81	13,10	19,68	48.076,74	4.637,40	6.966,72
B2	354,00	142,49	8,56	19,68	50.441,46	3.030,24	6.966,72
TOTAL	1.767,10	164,31	7,33	26,16	290.359,37	12.957,60	46.231,73

Tabla 7: Demandas energéticas anuales en el estado actual

4.3.9. Resultados con las medidas de mejora.

En colaboración con los profesores de la *Universidade do Minho* [21], preparé una lista de posibles medidas de mejora de la eficiencia energética de las viviendas del *Complexo Habitacional Picoto*, de acuerdo con las tecnologías propuestas para el proyecto *IEA EBC Annex 75 - Cost-effective Building Renovation at District Level Combining Energy Efficiency & Renewables* [22]. Se pueden clasificar, de modo general, en las siguientes tipologías:

- Fachadas y suelos en voladizo: sistemas de aislamiento por el exterior (SATE) mediante paneles aislantes de lana mineral o poliuretano expandido fijados a las

fachadas existentes, o bien, fachadas ventiladas con aislamiento de lana mineral. Los espesores de los aislamientos oscilan entre los 8 y los 20 cm.

- Tejadados inclinados: sustitución de los paños inclinados existentes por paneles aislantes tipo *sandwich* con aislamiento térmico de lana mineral o de espuma de poliuretano. Los espesores de los aislamientos oscilan entre los 3 y los 10 cm.
- Puentes térmicos: reducción mediante la implementación de un aislamiento continuo en toda la envolvente térmica del edificio, incluidos los petos de cubierta.
- Carpinterías exteriores: sustitución de las carpinterías actuales por otras con mayores niveles de estanqueidad y de aislamiento térmico, tanto en los marcos como en los vidrios. Se plantean marcos con rotura de puente térmico fabricados en aluminio o en PVC. Los vidrios propuestos son dobles, y además pueden ser de baja emisividad e incluso tener control solar.
- Instalaciones: sistemas individuales o centralizados de climatización y producción de agua caliente sanitaria, basados en el uso de bombas de calor eléctricas o de calderas de biomasa.
- Energías renovables: sistemas individuales o centralizados de energía solar térmica y fotovoltaica.

Finalmente, seleccionamos quince medidas concretas de mejora de la envolvente térmica para las viviendas basadas en elementos pasivos, y con distinto grado de exigencia en los objetivos de mejora. Este proceso supuso crear nuevos materiales y cerramientos en *SG SAVE (Open Studio)* [23], de manera análoga al trabajo realizado para simular energéticamente el caso de referencia. Algunos espesores están condicionados por los productos existentes en el mercado. También he recalculado todos los puentes térmicos.

Como materiales más determinantes en la mejora de la eficiencia energética, en la (Tabla 8) se muestran las características termofísicas de los tres aislamientos térmicos empleados.

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD (W/(m K))	CALOR ESPECÍFICO (J/(kg K))	DENSIDAD (kg/m ³)
MW lana mineral	0,036	800,000	115,000
EPS poliuretano expandido	0,038	1.000,000	30,000
PUR espuma de poliuretano	0,027	1.000,000	40,000

Tabla 8: Características de los aislamientos térmicos empleados

He simulado por separado con *SG SAVE (Open Studio)* estas quince medidas de mejora energética de la envolvente térmica aplicadas a cada una de las siete alineaciones de viviendas del *Complejo Habitacional Picoto*, lo que ha supuesto hacer ciento cinco simulaciones energéticas, además de siete del caso de referencia. Sin embargo, no he tenido que definir las nuevas posibles instalaciones de climatización, ya que se han mantenido las instalaciones virtuales definidas anteriormente, con rendimientos del 100 %. En fases posteriores de este estudio, he aplicado como coeficientes de conversión los rendimientos de las nuevas instalaciones, y según sus vectores energéticos, he aplicado también los factores de paso de energía final a energía primaria y a emisiones de CO₂, de acuerdo con la normativa portuguesa. Estos datos han sido facilitados por los profesores de la *Universidade do Minho*. En la (Tabla 9) muestro las principales características de los nuevos sistemas propuestos, tanto para las instalaciones como para la incorporación de energía renovable.

SISTEMA DE SUMINISTRO ENERGÉTICO	CALEFACCIÓN	REFRIGERACIÓN	AGUA CALIENTE SANITARIA	ENERGÍA RENOVABLE
Descentralizado convencional	Radiador eléctrico Rto. = 1,00	<i>Multi – Split</i> <i>EER = 3,00</i>	Calentador de gas natural Rto. = 0,71	---
Centralizado con bomba de calor	Bomba de calor <i>COP/SCOP = 4,06/3,77</i>	Bomba de calor <i>EER/SEER = 3,97/8,41</i>	Bomba de calor <i>COP = 4,10</i>	---
Centralizado con bomba de calor y energía solar térmica	Bomba de calor <i>COP/SCOP = 4,06/3,77</i>	Bomba de calor <i>EER/SEER = 3,97/8,41</i>	Bomba de calor <i>COP = 4,10</i>	Solar térmica para agua caliente sanitaria
Centralizado con bomba de calor y energía solar fotovoltaica	Bomba de calor <i>COP/SCOP = 4,06/3,77</i>	Bomba de calor <i>EER/SEER = 3,97/8,41</i>	Bomba de calor <i>COP = 4,10</i>	Solar fotovoltaica
Centralizado con caldera de biomasa	Caldera de biomasa Rto. = 1,07	---	Caldera de biomasa Rto. = 1,07	---

Tabla 9: Características de las nuevas instalaciones propuestas

En la (Tabla 10) figuran las demandas anuales totales de calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria para cada uno de los casos estudiados, para el total de las siete alineaciones de viviendas, normalizados por la superficie habitable acondicionada. Las demandas energéticas para el agua caliente sanitaria (ACS) son siempre las mismas, ya que las medidas de mejora de eficiencia energética aplicadas a la envolvente térmica de las viviendas no les influyen de ninguna manera. Por eso, no aparecen en la gráfica comparativa (Figura 24).

CASO DE ESTUDIO	DEMANDAS ENERGÉTICAS TOTALES (kWh/(m ² año))		
	CALEFACCIÓN	REFRIGERACIÓN	ACS
Caso de referencia	164,31	7,33	26,16
Medida de mejora 01	118,30	13,25	26,16
Medida de mejora 02	113,49	15,34	26,16
Medida de mejora 03	110,92	15,30	26,16
Medida de mejora 04	110,92	15,31	26,16
Medida de mejora 05	113,27	15,47	26,16
Medida de mejora 06	113,98	15,33	26,16
Medida de mejora 07	111,12	15,28	26,16
Medida de mejora 08	111,13	15,32	26,16
Medida de mejora 09	113,66	15,46	26,16
Medida de mejora 10	114,65	15,24	26,16
Medida de mejora 11	124,80	9,33	26,16
Medida de mejora 12	133,88	7,88	26,16
Medida de mejora 13	129,44	8,64	26,16
Medida de mejora 14	156,98	8,06	26,16
Medida de mejora 15	156,94	8,91	26,16

Tabla 10: Demandas energéticas totales

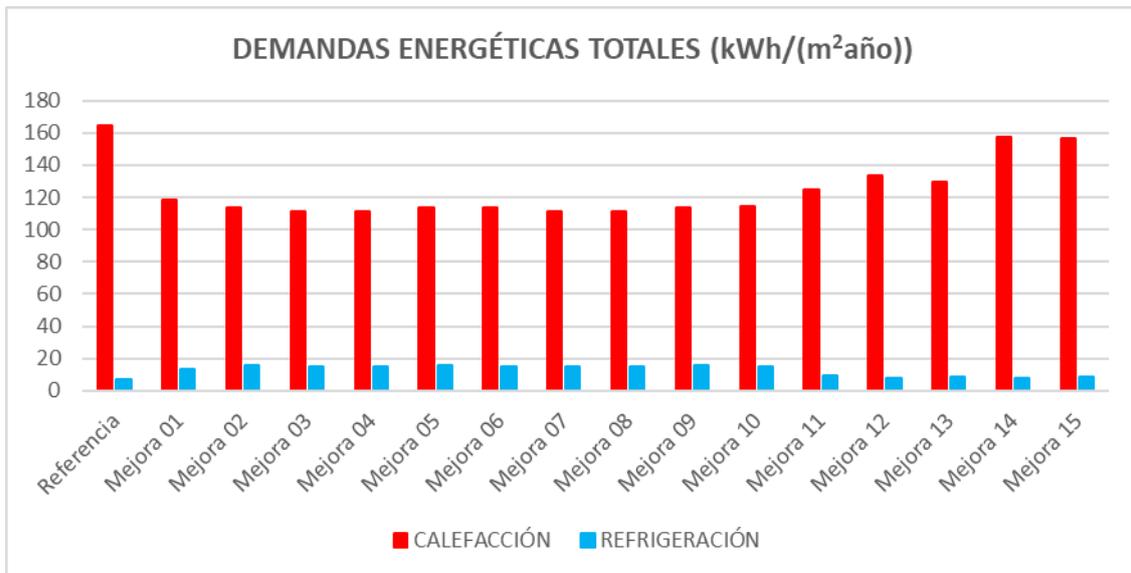


Figura 24: Demandas energéticas totales

Se puede ver cómo la demanda energética de calefacción es, en todos los casos, muy superior a la demanda energética de refrigeración. Esto es debido a los condicionantes externos debidos al clima y a la poca captación solar, como consecuencia de la pequeña superficie acristalada y de las sombras recibidas por las laderas circundantes.

Atendiendo sólo a las demandas de calefacción, por ser las principales, se observa que los mejores ahorros se consiguen con las medidas vinculadas al aislamiento de fachadas y los suelos en voladizo, por ser los elementos con más superficie dentro de la envolvente térmica de las viviendas. Influye, lógicamente, la cantidad y la calidad del aislamiento térmico empleado. Los segundos mayores ahorros se consiguen con las intervenciones en los tejados inclinados, con menor superficie si se comparan con las fachadas. Por último, con las dos medidas propuestas para sustituir las carpinterías exteriores, se consiguen los menores ahorros energéticos por ser los elementos con menor presencia en la envolvente térmica.

Teniendo en cuenta el enfoque del ahorro energético que proporciona cada una de las medidas de mejora propuestas respecto al caso de referencia, pero también el coste de cada una de ellas a lo largo de su vida útil, he elegido cinco paquetes de medidas de mejora de eficiencia energética de acuerdo con los profesores de la *Universidade do Minho*. Todos están compuestos por tres medidas de mejora de la eficiencia energética relativas a fachadas y suelos en voladizo, tejados inclinados y carpinterías exteriores, respectivamente.

En la (Tabla 11) y en la (Figura 25) figuran sus demandas anuales totales de calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria para cada uno de los paquetes estudiados, para el total de las siete alineaciones de viviendas normalizadas por la superficie habitable acondicionada.

CASO DE ESTUDIO	DEMANDAS ENERGÉTICAS TOTALES (kWh/(m ² año))		
	CALEFACCIÓN	REFRIGERACIÓN	ACS
Caso de referencia	164,31	7,33	26,16
Paquete de medidas de mejora P1	99,15	8,61	26,16
Paquete de medidas de mejora P2	100,59	8,12	26,16
Paquete de medidas de mejora P3	84,86	8,98	26,16
Paquete de medidas de mejora P4	82,70	8,68	26,16
Paquete de medidas de mejora P5	95,11	8,76	26,16

Tabla 11: Demandas energéticas totales de los paquetes de medidas de mejora

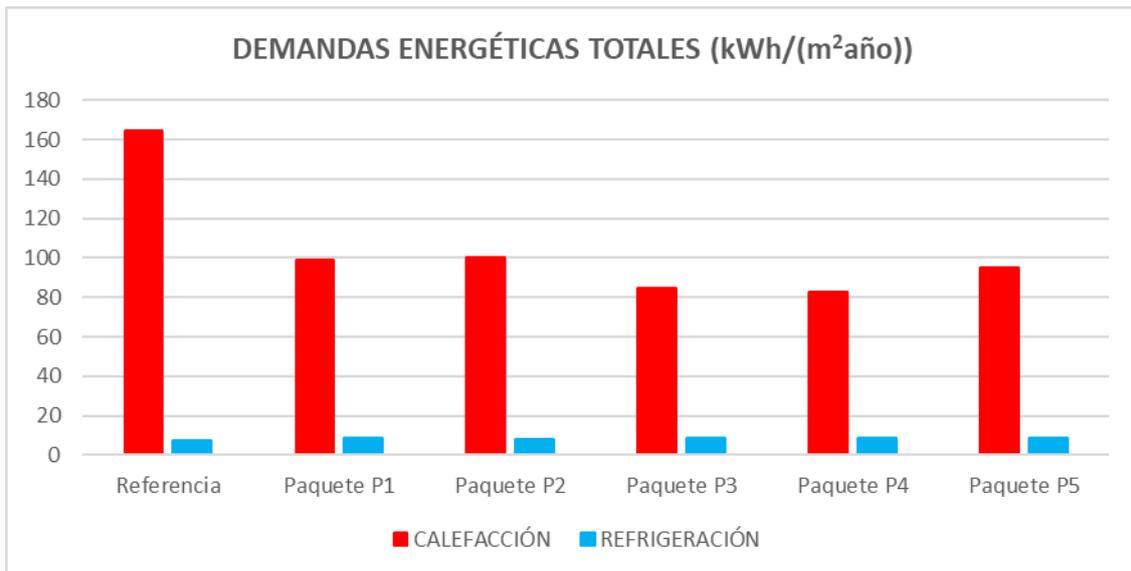


Figura 25: Demandas energéticas totales de los paquetes de medidas de mejora

En las cinco propuestas que he estudiado, las demandas energéticas de refrigeración son mucho menores que las demandas energéticas de calefacción, como sucedía al estudiar las medidas de mejora por separado. Además, presentan valores muy similares entre sí, y ligeramente superiores al del caso de referencia, debido a la mejora del aislamiento térmico de las viviendas. Respecto a las demandas energéticas de calefacción, en todos los casos se consigue un notable ahorro energético respecto al caso de referencia, siendo el mejor en este sentido el paquete de medidas de mejora P4, y el peor el P2.

4.3.10. Estudio de coste – efectividad.

El estudio de la eficiencia energética para las medidas y paquetes de mejora lo he complementado con un estudio económico, con el objeto de conocer el punto óptimo desde el enfoque de coste – efectividad.

En el caso de referencia, he propuesto una serie de medidas de mejora que no tienen como objetivos reducir las demandas, los consumos energéticos o las emisiones de CO₂. Por este motivo, no he tenido que hacer una nueva simulación energética ya que los resultados obtenidos hubiesen sido los mismos. Se trata de medidas de mantenimiento necesarias para restituir las viviendas a su estado original, empleando materiales y tecnologías lo más parecidas a las usadas en su proceso de construcción, y que sólo afectan a las partes dañadas:

- Fachadas y suelos en voladizo: reparación del mortero dañado, limpieza mecánica y pintura exterior.

- Tejados inclinados: limpieza y reparación de las filtraciones de agua.
- Puentes térmicos: ninguna acción.
- Carpinterías exteriores: sustitución de puertas y ventanas estropeadas y reparación de las juntas de estanqueidad entre las carpinterías exteriores y las fachadas.
- Instalaciones: sustitución de calentadores de agua y radiadores, manteniendo como vector energético la electricidad.
- Energías renovables: ninguna acción.

Para la valoración económica de cada una de las medidas de mejora de la eficiencia energética, he tenido en cuenta tanto el coste de las nuevas unidades de obra que se van a incorporar, como el de las actuaciones de mantenimiento que habrá que realizar en las zonas donde no se hagan mejoras. Por ejemplo, en una medida de mejora que afecte a las fachadas y a los suelos en voladizo, además del coste de estas nuevas unidades, he tenido en cuenta el coste de mantenimiento de los tejados inclinados, las carpinterías exteriores y las instalaciones.

He hecho una medición detallada de todas las partes de la envolvente térmica de las siete alineaciones de viviendas para poder hacer el presupuesto de las medidas de mejora. Para buscar los precios descompuestos de puesta en obra y los costes de mantenimiento de todas las unidades de obra, incluidas las de mantenimiento, he utilizado la base de precios [27] por ser la fuente habitualmente empleada por los profesores de la *Universidade do Minho* [21].

En la (Tabla 12) y en la (Figura 26) expongo, a modo de resumen comparativo, los costes totales de inversión necesarios para implementar las unidades de obra relativas a la envolvente térmica en el caso de referencia y en las medidas de mejora. Estos valores recogen la intervención en el conjunto de las siete alineaciones de viviendas.

Se puede observar que las medidas de intervención en las fachadas y en los suelos en voladizo (01-10) son las más costosas, especialmente las que implican la colocación de fachadas ventiladas (01-02). Las medidas de intervención en los tejados inclinados (11-13) y en las carpinterías exteriores (14-15) tienen un coste menor, y con valores similares entre ellas. También es importante destacar que el caso de referencia conlleva unos costes de mantenimiento necesarios, aunque no impliquen ninguna mejora energética, por lo que no realizar mejoras no resulta gratuito.

CASO DE ESTUDIO	COSTE DE INVERSIÓN (€)
Caso de referencia	161.608,63
Medida de mejora 01	711.744,29
Medida de mejora 02	665.756,89
Medida de mejora 03	689.653,47
Medida de mejora 04	682.434,06
Medida de mejora 05	542.014,27
Medida de mejora 06	535.186,89
Medida de mejora 07	581.067,44
Medida de mejora 08	576.828,95
Medida de mejora 09	484.677,97
Medida de mejora 10	480.330,80
Medida de mejora 11	291.945,51
Medida de mejora 12	258.029,26
Medida de mejora 13	232.214,39
Medida de mejora 14	260.080,17
Medida de mejora 15	229.753,84

Tabla 12: Costes de inversión total para el caso de referencia y las medidas de mejora

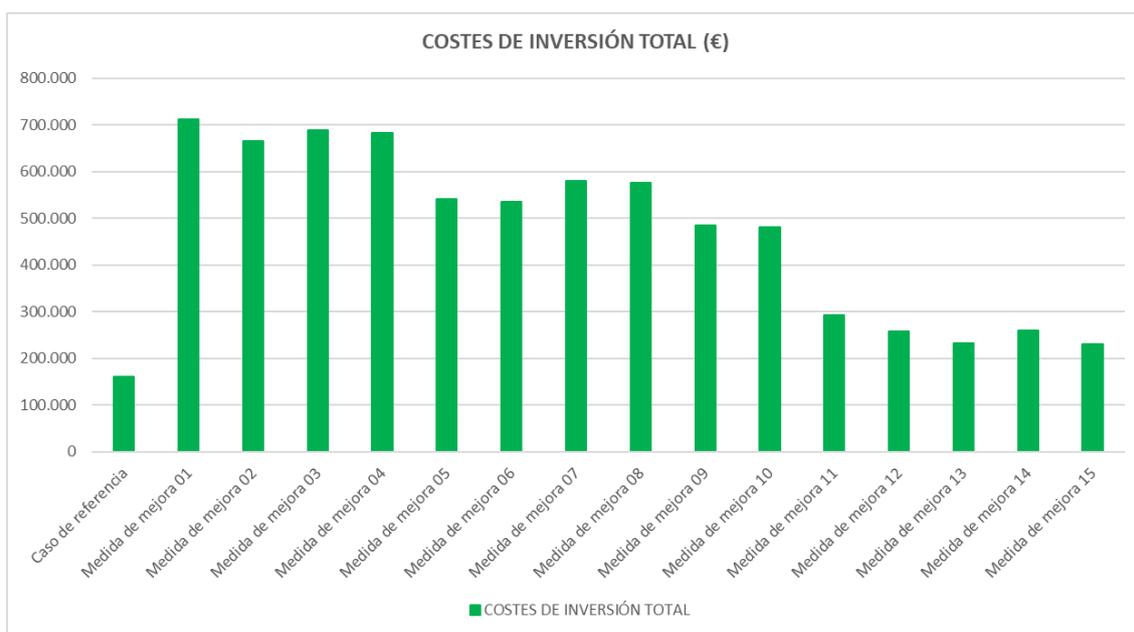


Figura 26: Costes de inversión total

Este presupuesto detallado y comparativo para las quince medidas y los cinco paquetes de mejora de eficiencia energética los he ensamblado en una hoja de cálculo, creada por los profesores de la *Universidade do Minho* con anterioridad para realizar este tipo de estudios de coste – efectividad. Esta herramienta de cálculo está basada en el Reglamento [28], y sirve para comparar la solución de rehabilitación de un edificio de referencia donde hay una intervención, pero sin mejora el rendimiento



energético, con medidas de mejora del rendimiento energético, considerando un período de tiempo determinado.

En el CTAC [20], los cálculos se realizan considerando un período de treinta años, para dos perspectivas distintas:

- La perspectiva social toma en cuenta los costos de las emisiones de carbono y no considera los valores del IVA. Para esta perspectiva, se considera una tasa de descuento del 3 %.
- En perspectiva privada, se considera que la tasa de descuento es del 6 %, se incluye el IVA y no se contabilizan los costos de las emisiones de carbono.

Posteriormente, los profesores de la *Universidade do Minho* han completado el estudio implementando a los cinco paquetes de medidas de mejora relativas a la envolvente térmica y al mantenimiento que yo había generado, las cinco opciones relativas a las nuevas instalaciones y al uso de energías renovables. Así, aparecen veinticinco nuevos casos de estudio, donde además han tenido en cuenta otros factores económicos como los costes energéticos, de mantenimiento y operación, las tasas por emisiones de gases de efecto invernadero, los precios de los distintos vectores energéticos y su evolución, así como la tasa de descuento, todo ello para un periodo de vida útil estimado de treinta años.

El conjunto de este trabajo descrito en los párrafos anteriores ha constituido mi aportación de I+D+i al proyecto y, dentro de mi participación en el proyecto *Annex 75* [22], ha dado lugar a esta publicación en la que también han intervenido otros investigadores participantes en el mismo, además de los profesores de la *Universidade do Minho*.

- Jon Terés-Zubiaga, Roman Bolliger, Manuela G. Almeida, Ricardo Barbosa, Jørgen Rose, Kirsten E. Thomsen, Eduardo Montero and Raúl Briones-Llorente. ***Cost-effective building renovation at district level combining energy efficiency & renewables – Methodology assessment proposed in IEA-Annex 75 and a demonstration case study.*** *Energy & Buildings*. 2020, 110280. Junio 2020. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110280.

Esta publicación figura en el “**Anexo 4**” de esta Tesis Doctoral.

4.3.11. Estudio de ciclo de vida.

Los profesores de la *Universidade do Minho* [21] me han facilitado los datos relativos a algunos de los impactos producidos por los principales materiales de construcción utilizados en cada una de las unidades de obra propuestas para las medidas de mejora y de mantenimiento, teniendo en cuenta sus ciclos de vida, calculados con *SimaPro* [29]:

- Emisiones de CO₂ equivalente (kg CO₂ eq.).
- Energía primaria embebida total (kWh).
- Energía primaria embebida no renovable (kWh).

Mi labor en este ámbito ha consistido en tomar las mediciones detalladas de las medidas de mejora y el caso de referencia que utilicé en el estudio de coste – efectividad, así como diseñar de una hoja de cálculo para adjudicar a cada medida y paquete de mejora los tres impactos ambientales descritos.

4.4. Listado de tablas.

Tabla 1: Recursos instalados en el HUBU.

Tabla 2: Salas de equipos de alta tecnología instalados en el HUBU.

Tabla 3: Equipos de alta tecnología instalados en el HUBU.

Tabla 4: Magnitudes físicas de los materiales de construcción.

Tabla 5: Magnitudes físicas de las carpinterías exteriores.

Tabla 6: Cerramientos de la envolvente térmica.

Tabla 7: Demandas energéticas anuales en el estado actual.

Tabla 8: Características de los aislamientos térmicos empleados.

Tabla 9: Características de las nuevas instalaciones propuestas.

Tabla 10: Demandas energéticas totales.

Tabla 11: Demandas energéticas totales de los paquetes de medidas de mejora.

Tabla 12: Costes de inversión total para el caso de referencia y las medidas de mejora.

4.5. Listado de figuras.

Figura 1: Hospital Universitario de Burgos – HUBU (© Google Maps).

Figura 2: Simplificaciones de la planta de consultas (© Raúl Briones Llorente).

Figura 3: Simplificaciones de las plantas de hospitalización (© Raúl Briones Llorente).

Figura 4: Simplificaciones de la planta de quirófanos (© Raúl Briones Llorente).

Figura 5: Modelización en 3D de la planta CHB.P1 de consultas (© Raúl Briones Llorente).

Figura 6: Modelización en 3D de la planta CHB.P3 de hospitalización (© Raúl Briones Llorente).

Figura 7: Modelización en 3D de la planta BTC.P0 de quirófanos (© Raúl Briones Llorente).

Figura 8: Modelización completa de la planta CHB.P3 de hospitalización (© Raúl Briones Llorente).

Figura 9: Comparación de consumos energéticos (© Raúl Briones Llorente).

Figura 10: Simplificaciones de la habitación 301 (© Raúl Briones Llorente).

Figura 11: Divergencia de las temperaturas interiores de la habitación 301 (© Raúl Briones Llorente).

Figura 12: Convergencia de las temperaturas interiores de la habitación 301 (© Raúl Briones Llorente).

Figura 13: 17 Objetivos de desarrollo sostenible (© ONU).

Figura 14: Vista aérea en planta del *Complejo Habitacional Picoto* (© Raúl Briones Llorente).

Figura 15: Estado de conservación (© Raúl Briones Llorente).

Figura 16: Simulación completa de las viviendas de la alineación A1 (© Raúl Briones Llorente).

Figura 17: Simulación completa de las viviendas de la alineación A2 (© Raúl Briones Llorente).



Figura 18: Simulación completa de las viviendas de la alineación A3 (© Raúl Briones Llorente).

Figura 19: Simulación completa de las viviendas de la alineación A4 (© Raúl Briones Llorente).

Figura 20: Simulación completa de las viviendas de la alineación A5 (© Raúl Briones Llorente).

Figura 21: Simulación completa de las viviendas de la alineación B1 (© Raúl Briones Llorente).

Figura 22: Simulación completa de las viviendas de la alineación B2 (© Raúl Briones Llorente).

Figura 23: Sección constructiva representativa (© Raúl Briones Llorente).

Figura 24: Demandas energéticas totales (© Raúl Briones Llorente).

Figura 25: Demandas energéticas totales de los paquetes de medidas de mejora (© Raúl Briones Llorente).

Figura 26: Costes de inversión total (© Raúl Briones Llorente).

4.6. Bibliografía.

[1] EFICANZA S.A. <<https://www.eficanza.es/es/inicio>> Último acceso: 27/09/2020.

[2] SACYL. Hospital Universitario de Burgos (HUBU). <<https://www.saludcastillayleon.es/CABurgos/es/complejo-hospitalario-burgos/hospital-universitario-burgos>> Último acceso: 17/09/2020.

[3] CALENER-GT. <<https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/DocumentosReconocidos/Paginas/documentos-reconocidos-no-vigentes.aspx>> Último acceso: 27/09/2020.

[4] TRNSYS®. Transient Systems Simulation Program. <<https://sel.me.wisc.edu/trnsys/index.html>> Último acceso: 17/09/2020.

[5] AutoCad. <<https://www.autodesk.es/products/autocad/overview?plc=ACDIST&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1>> Último acceso: 27/09/2020.



[6] Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación.

<<https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/realDecreto/RD3142006.pdf>>

Último acceso: 27/09/2020.

[7] Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación.

<<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1999-21567>> Último acceso:

27/09/2020.

[8] Real Decreto 2429/1979, de 6 de julio, por el que se aprueba la norma básica de edificación NBE-CT-79, sobre condiciones térmicas en los edificios.

<<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1979-24866>> Último acceso:

27/09/2020.

[9] Real Decreto 1751/1998, de 31 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) y sus Instrucciones Técnicas Complementarias (ITE) y se crea la Comisión Asesora para las Instalaciones Térmicas de los Edificios. <<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1998-18795>> Último acceso: 27/09/2020.

[10] Código Técnico de la Edificación. Documento Básico de Ahorro de Energía DB-HE. <<https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/DBHE.pdf>>

Último acceso: Último acceso: 27/09/2020.

[11] Código Técnico de la Edificación. Catálogo Informático de Elementos

Constructivos (CEC). <<https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-catalogo-informatico-elementos-constructivos.html>> Último acceso: 27/09/2020.

[12] Código Técnico de la Edificación. <<https://www.codigotecnico.org/>> Último acceso: Último acceso: 27/09/2020.

[13] Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC).

<<https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-recursos/menu-aplicaciones/282-herramienta-unificada-lider-calener.html>> Último acceso: 27/09/2020.

[14] Tess Libraries. <<http://www.trnsys.com/tess-libraries/>> Último acceso: 27/09/2020.

[15] TRNBuild. <<http://www.trnsys.com/features/suite-of-tools.php.html>> Último acceso: 28/09/2020.



- [16] González Gil A., López-González J.L., Fernández M., Eguía P., Erkoreka A., Granada E. Thermal energy demand and potential energy savings in a Spanish surgical suite through calibrated simulations. *Energy & Buildings* 174 (2018) 513-526.
- [17] W Stuart Dols, Steven J Emmerich, Brian J Polidoro. Used coupled energy, airflow and indoor air quality software (TRNSYS/CONTAM) to evaluate building ventilation strategies. *Building Services Engineering Research & Technology* 37(2) (2016) 163-175.
- [18] Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>> Último acceso: 28/09/2020.
- [19] Gobierno de España. Agenda 2030. <<https://www.agenda2030.gob.es/>> Último acceso: 28/09/2020.
- [20] CTAC (Research Centre in Territory, Environment and Construction). <<http://ctac.uminho.pt/>> Último acceso: 08/09/2020.
- [21] Universidade do Minho. <<https://www.uminho.pt/PT>> Último acceso: 08/09/2020.
- [22] IEA EBC Annex 75 - Cost-effective Building Renovation at District Level Combining Energy Efficiency & Renewables. <<https://annex75.iea-ebc.org/>> Último acceso: 08/09/2020.
- [23] SG SAVE (Open Studio). <<http://www.efinovatic.es/energyPlus/>> Último acceso: 23/09/2020.
- [24] Google Sketchup. <<https://www.sketchup.com/es>> Último acceso: 23/09/2020.
- [25] Open Studio. <<https://www.openstudio.net/>> Último acceso: 18/09/2020.
- [26] ITE 50: Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios. <http://home.fa.utl.pt/~lcaldas/LNEC_ITE_50.pdf> Último acceso: 29/09/2020.
- [27] Gerador de preços para construção civil. Portugal. CYPE Ingenieros, S.A. <<http://www.geradordeprecos.info/>> Último acceso: 15/09/2020.



[28] Reglamento Delegado (UE) N.º 244/2012 de la Comisión de 16 de enero de 2012, que complementa la Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la eficiencia energética de los edificios, estableciendo un marco metodológico comparativo para calcular los niveles óptimos de rentabilidad de los requisitos mínimos de eficiencia energética de los edificios y de sus elementos.

<[https://eur-](https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:081:0018:0036:ES:PDF)

[lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:081:0018:0036:ES:PDF](https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:081:0018:0036:ES:PDF)>

Último acceso: 30/09/2020.

[29] SimaPro. < <https://simapro.com/> > Último acceso: 30/09/2020.

SUBCHAPTER 4.3

Result 3: District-level
cost-effectiveness study
of energy efficiency
measures combined with
renewable energy

4.3. Result 3: District-level cost-effectiveness study of energy efficiency measures combined with renewable energy.

During my period as a Doctorate student, I have had the opportunity to carry out an international research stay to improve my scientific training and obtain the "International Doctor" mention.

The research stay has lasted four months, from October 1, 2019 to January 31, 2020. It has been developed at the CTAC (Research Center in Territory, Environment and Construction) [20] of the *Universidade do Minho* [21], located on the *Azurém* Campus in the city of *Guimarães*, in Portugal. It has been linked to my participation in the project IEA EBC Annex 75 - Cost-effective Building Renovation at District Level Combining Energy Efficiency & Renewables [22], of the International Energy Agency. At present, I continue collaborating in this R&D&I project.

4.3.1. IEA EBC Annex 75 - Cost-effective Building Renovation at District Level Combining Energy Efficiency & Renewables.

The transformation of existing buildings into low-emission and energy-efficient buildings is paramount in cities, where many buildings continue to rely heavily on the use of fossil fuels for their thermal systems. However, at the same time, there are specific opportunities to develop and make good use of district level solutions on an urban scale.

In this context, the project aims to determine the profitability of various approaches that combine measures to improve energy efficiency and measures for the implementation of renewable energy at the district level, considering that finding the balance between both types of actions for the existing building stock is a complex task.

The aim is to provide guidance to policy makers, companies working in the field of energy transition, as well as building owners to cost-effectively transform the current energy use model in the existing building stock in the cities towards low-emission and low-energy solutions. Accurate and understandable information, guidelines, tools and recommendations will be provided to help decision makers in the public and private sectors choose the best options that apply to their specific needs.

This project has been divided into four main subtasks to be developed by the different participating members, which in turn have been divided into work packages. It is directed by Professor Manuela Almeida from the *Universidade do Minho* [21], and forty-seven researchers from universities and research centres from the following countries

participate: Austria, Belgium, Czech Republic, China, Denmark, Germany, Italy, Netherlands, Norway, Portugal, Spain, Sweden and Switzerland.

4.3.2. General description of the *Complexo Habitacional Picoto*.

The *Universidade do Minho* [21] selected two groups of public social housing located in the city of *Braga* (Portugal): (i) *Barrio Social de Santa Tecla*; (ii) *Complexo Habitacional Picoto*. Public ownership facilitates obtaining technical documentation and access to homes to collect technical data. In addition, due to their age and state of conservation, they are candidates for an energy improvement project, among other aspects.

My work within this project focused on the energy simulation of the *Complexo Habitacional Picoto*, whose main characteristics are the following:

- 50 semi-detached double-height single family dwellings gathered into seven rows.
- Living area: 1,767.10 m².
- Building date: 1990.

4.3.3. Geometric definition.

The *Complexo Habitacional Picoto* consists of seven rows of semi-detached houses, organized as follows (Figure 14):

- A1, A2, A3, A4 y A5: with six dwellings each one of type A.
- B1 y B2: with ten dwellings each one of type B.
- The dwellings have a poor constructive quality.
- The conservation state is poor and there are many self-constructions attached to the houses (Figure 15).
- They are embedded next to very vertical slopes, with the risks that this can carry, and also being natural elements that project shade on the houses.



Figure 14: Aerial plain view of *Complejo Habitacional Picoto*



Figure 15: State of conservation

After analysing an available photographic report and the scarce existing graphic documentation, I have drawn new floor and sections plans of each type of house, with dimensions that are coherent with each other, in order to generate the three-dimension models later.

The simplification process to obtain the thermal zones to be modelled has been analogous to the one used in energy modelling of Burgos University Hospital (*HUBU*) [2]. Although I have used the SG SAVE (Open Studio) energy simulation program [23] in this case, the three-dimension modelling is supported by Google Sketchup [24], as in TRNSYS® [4].

In (Figures 16-22) I show the final appearance of each of the seven simulated single-family rows of dwellings including the external shadow objects, coloured in purple, which are the other buildings and the slopes of the nearby mountains, which project shadows on the houses throughout the day, influencing their energy demands.

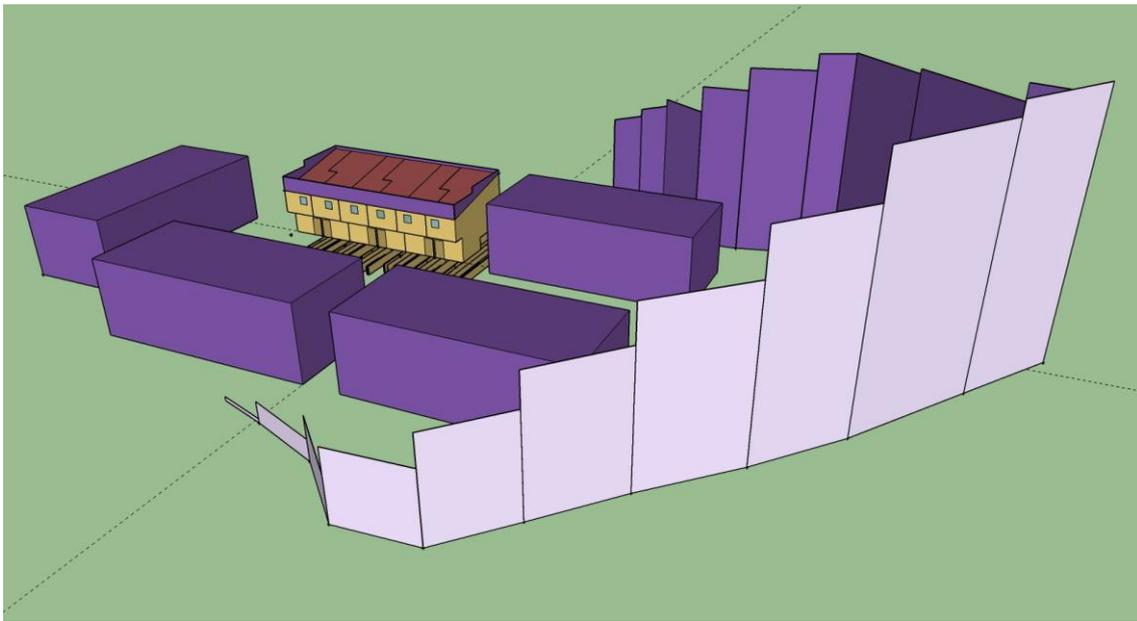


Figure 16: Complete simulation of the row of dwellings A1



Figure 17: Complete simulation of the row of dwellings A2

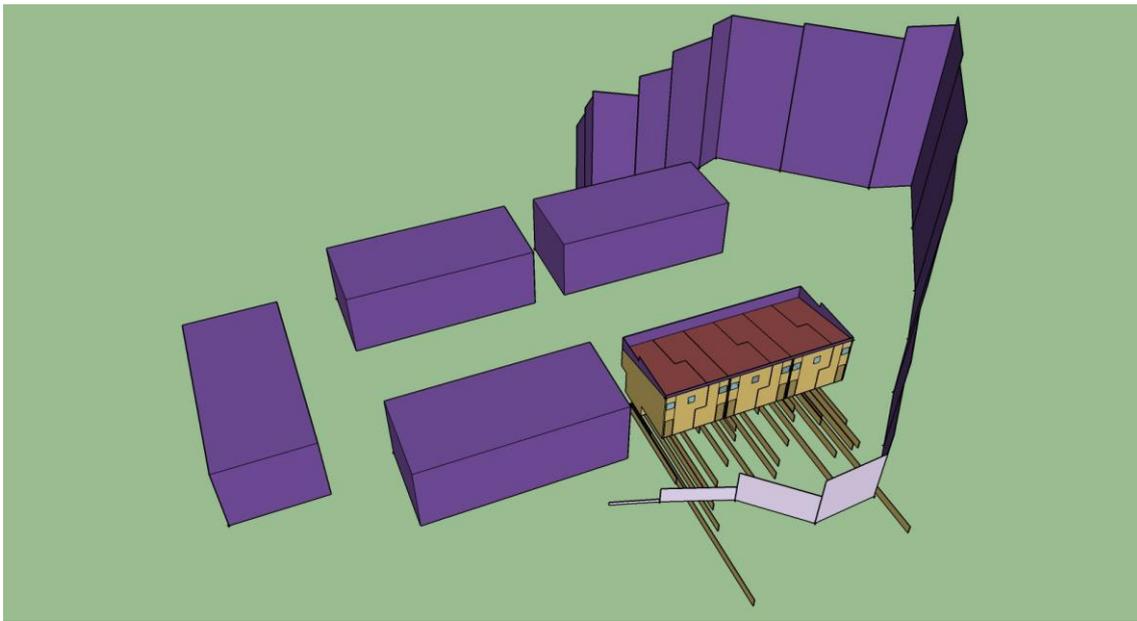


Figure 18: Complete simulation of the row of dwellings A3

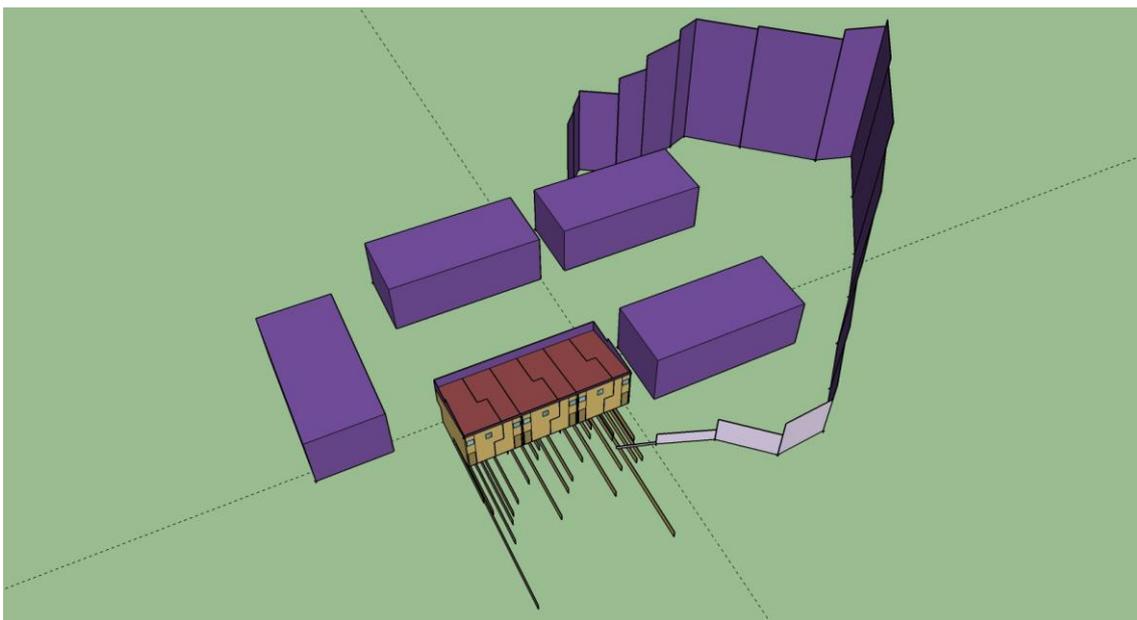


Figure 19: Complete simulation of the row of dwellings A4

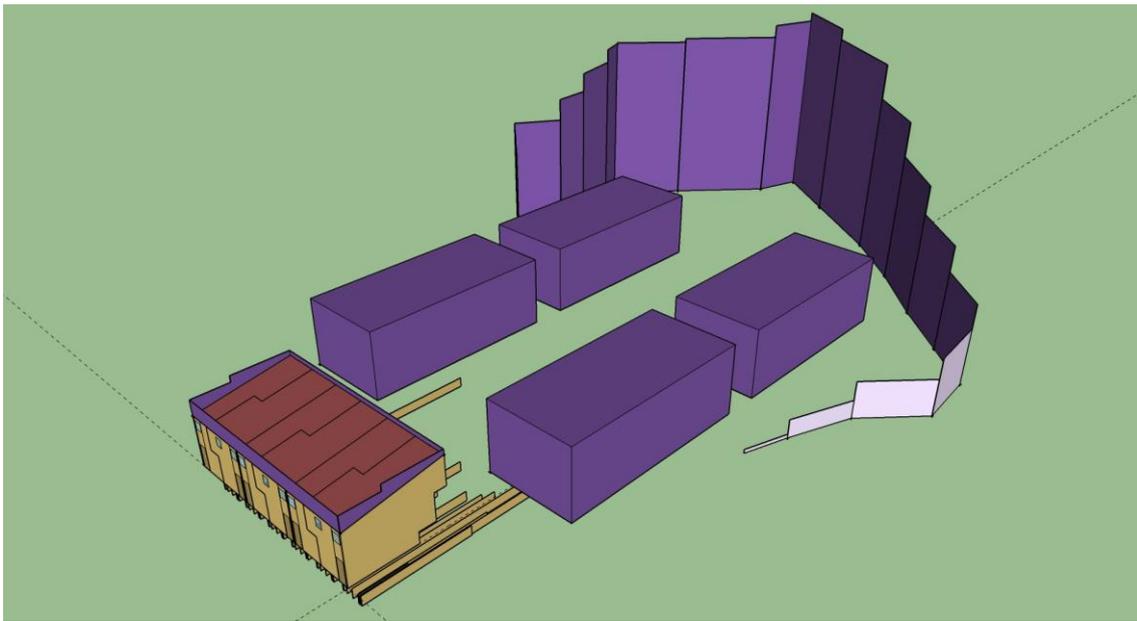


Figure 20: Complete simulation of the row of dwellings A5



Figure 21: Complete simulation of the row of dwellings B1



Figure 22: Complete simulation of the row of dwellings B2

4.3.4. Constructive description.

After detailed analysis of the existing documentation, I have identified six types of exterior enclosures and two types of interior partitions. I have represented the elements of the thermal envelope of the dwellings in the representative section of (Figure 23), whose legend I explain in (Table 6). The façades types 1 and 2 are present forming panels along all of them, being type 1 the most predominant, and that is why I have represented them in gradient.

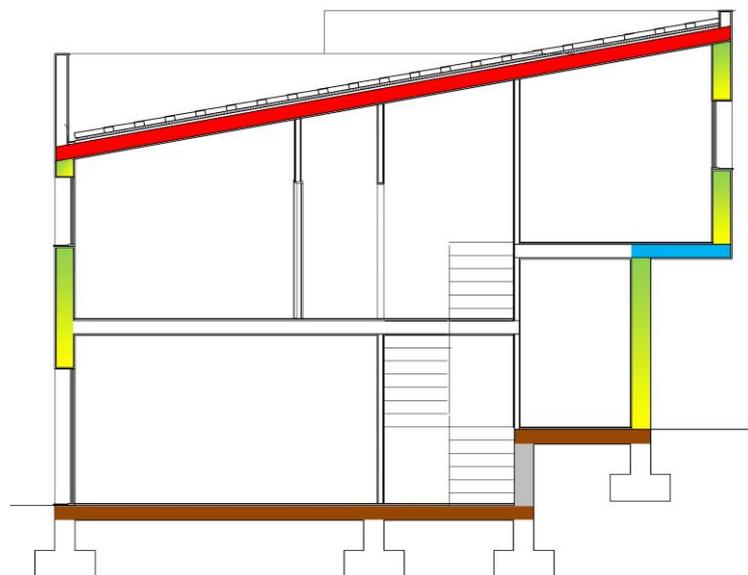


Figure 23: Representative construction section

COLOUR	TYPE OF EXTERNAL ENCLOSURE
	Floor over the ground
	Projected floor
	Sloping roof
	Façade 1
	Façade 2
	Wall in contact with the ground

Table 6: Thermal envelope enclosures

Following a method analogous to the one used in the energy modelling of the Burgos University Hospital (*HUBU*) [2], I have identified all the layers of the construction materials that form each exterior enclosure and each interior partition, as well as the frames and glass of the exterior carpentry.

To define the thermophysical properties of these constructive elements, I studied three alternate methods according to the origin of the starting data, and in accordance with the professors of the *Universidade do Minho* [21], we opted for using a mixed solution:

- Spanish regulations: SG SAVE (Open Studio) [23] materials library in accordance with the *Catálogo Informático de Elementos Constructivos (CEC)* [11] of the *Código Técnico de la Edificación (CTE)* [12].
- Portuguese regulations: using only the thermal transmittance values for complete constructive assemblies that appear in document *ITE 50* [26] relative to the energy efficiency of buildings, choosing the ones that are most similar to those existing in the dwellings of this project. Layers composition and all thermophysical properties would not be considered, nor would thermal inertia be calculated.
- Mixed solution: extracting from [26] the only thermophysical properties that it offers for each construction material: (i) thermal conductivity; (ii) thermal resistance; and furthermore, completing the rest of the properties from [11]: (i) density; (ii) specific heat.

In addition, I have considered the colour of the outer layer of each enclosure and of the frames of the exterior carpentry to calculate their solar absorptance.

To define the exterior carpentry, I have also considered the solar factor of the glass and the permeability to the outside air.

I have identified all the types of thermal bridges existing in the dwellings, and I have measured their lengths in the three-dimensional models. Their linear thermal transmittances have been calculated using the thermal bridges library that is included in SG SAVE (Open Studio), whose values are in accordance with the catalogue [11].

I have considered their construction design, the thermal transmittance of the incident construction elements and their thicknesses. The existence, or not, of thermal insulation, its position in the order of the layers of the construction materials, and whether it is continuous or if it is interrupted by another material is determinant.

4.3.5. Operational definition.

SG SAVE (Open Studio) [23] uses use profiles in accordance with the *Código Técnico de la Edificación (CTE)* [12]. I have chosen the residential use profile but adapting it from Open Studio [25] to the schedules of the setpoint temperatures, ventilation and internal loads of the Portuguese regulations, and which have been provided by the professors of the *Universidade do Minho* [21].

4.3.6. Weather data files.

As SG SAVE (Open Studio) [23] is a software to verify Spanish energy regulations, it does not include files for Portuguese cities. But from Open Studio [25] it is possible to access the meteorological files available for cities around the world.

The meteorological file corresponding to the city of *Braga* is not available, so according to the professors of the *Universidade do Minho* [21], we opted to use the file of the nearby city of *Porto*.

4.3.7. Systems definition.

I have calculated the total domestic hot water daily demand for each row of dwellings according to the expected occupancy, distinguishing between two and three-bedroom houses, considering a typical demand of forty litres per person per day, according to Portuguese regulations. For the production of domestic hot water, each dwelling has a heater without accumulation powered by natural gas, with a performance of 80.00 %. There is no contribution from renewable energies.

The dwellings do not have any individual or collective system, neither for heating, nor for cooling. Heating needs are satisfied using electric radiators at the users' will. In these cases, the so-called virtual air conditioning systems are used to carry out the energy simulations of the buildings, which allow the simulation to be carried out and offer quite conservative demand and consumption results, but comparable with the results obtained in other buildings in the similar circumstances.

The professors at the *Universidade do Minho* [21] have provided me with the values used to define these virtual systems in accordance with Portuguese regulations:

- Virtual electric heating system, with 100 % efficiency.
- Virtual electric cooling system, with a performance of 300 %, which was changed to 100 % to obtain the energy demands relative to equipment with the same performance. Subsequently, it is always possible to apply a correction coefficient to the demands obtained if a different performance is to be considered.

4.3.8. Reference case results.

I have separately performed the seven annual hourly energy simulations for each of the seven rows of dwellings in their current state. In (Table 7) I show the results obtained for the energy demands of heating, cooling and domestic hot water, respectively, both with total annual values and with the normalized values for the conditioned floor surface.

REFERENCE CASES	SURFACE (m ²)	TOTAL ENERGY DEMANDS [kWh/(m ² year)]			TOTAL ENERGY DEMANDS (kWh/year)		
		HEATING	COOLING	DHW	HEATING	COOLING	DHW
A1	211.90	182.56	5.25	30.48	38,684.46	1,112.48	6,458.71
A2	211.90	185.24	4.16	30.48	39,252.36	881.50	6,458.71
A3	211.90	194.02	0.12	30.48	41,112.84	25.43	6,458.71
A4	211.90	189.24	1.90	30.48	40,099.96	402.61	6,458.71
A5	211.50	154.57	13.56	30.56	32,691.56	2,867.94	6,463.44
B1	354.00	135.81	13.10	19.68	48,076.74	4,637.40	6,966.72
B2	354.00	142.49	8.56	19.68	50,441.46	3,030.24	6,966.72
TOTAL	1,767.10	164.31	7.33	26.16	290,359.37	12,957.60	46,231.73

Table 7: Annual energy demands in the current state

4.3.9. Renovation measures results.

I prepared, in collaboration with the professors of the *Universidade do Minho* [21], a list of possible measures to improve the energy efficiency of the dwellings of the *Complexo Habitacional Picoto*, in accordance with the technologies proposed for the IEA EBC Annex 75 - Cost- effective Building Renovation at District Level Combining Energy Efficiency & Renewables [22]. They can be classified, in a general way, into the following typologies:

- Façades and projected floors: exterior insulation systems (ETICS) using insulating panels made of mineral wool or expanded polyurethane fixed to existing facades, or ventilated facades with mineral wool insulation. The thicknesses of the insulation range between 8 and 20 cm.

- Sloping roofs: replacement of existing sloping panels with sandwich-type insulating panels with thermal insulation of mineral wool or polyurethane foam. The thicknesses of the insulation range between 3 and 10 cm.
- Thermal bridges: reduction through the implementation of continuous insulation throughout the thermal envelope of the building, including the roof parapets.
- Exterior carpentry: replacement of current carpentry with a new one with higher levels of tightness and thermal insulation, both in the frames and in the glass. Frames with thermal bridge break made of aluminium or PVC are proposed. The proposed glasses are double and can also be low emissivity and even have solar control.
- Systems: individual or centralized systems for HVAC and production of domestic hot water, based on the use of electric heat pumps or biomass boilers.
- Renewable energies: individual or centralized solar thermal and photovoltaic energy systems.

Finally, we selected fifteen specific renovation measures to improve the thermal envelope for dwellings based on passive elements, and with different degrees of demand in the improvement objectives. This process involved creating new materials and enclosures in SG SAVE (Open Studio) [23], similarly to the work done to energetically simulate the reference case. Some thicknesses are conditioned by the products available on the market. I have also recalculated all the thermal bridges.

(Table 8) shows the thermophysical characteristics of the three thermal insulations used, as the most decisive materials in improving energy efficiency.

MATERIAL	CONDUCTIVITY (W/(m K))	SPECIFIC HEAT (J/(kg K))	DENSITY (kg/m ³)
MW mineral wool	0.036	800.000	115.000
EPS expanded polyurethane	0.038	1,000.000	30.000
PUR polyurethane foam	0.027	1,000.000	40.000

Table 8: Characteristics of the used thermal insulation

I have simulated separately with SG SAVE (Open Studio) these fifteen energy improvement measures of the thermal envelope applied to each of the seven rows of dwellings of the *Complejo Habitacional Picoto*. This has meant doing one hundred and five energy simulations, in addition to seven of the reference case. However, I have not had to define the new possible HVAC systems, since the virtual systems previously defined have been maintained, with 100 % performance. In later phases of this study, I have applied the performances of the new systems as conversion coefficients, and

according to their energy vectors, I have also applied the factors of transition from final energy to primary energy and CO₂ emissions, in accordance with Portuguese regulations. These data have been provided by the professors of the *Universidade do Minho*. In (Table 9) I show the main characteristics of the new systems proposed, both for the facilities and for the incorporation of renewable energy.

ENERGY SUPPLY SYSTEM	HEATING	COOLING	DOMESTIC HOT WATER	RENEWABLE ENERGY
Conventional decentralised	Electric heater h = 1.00	Multi – Split EER = 3.00	Natural gas heater h = 0.71	---
Centralised with heat pump	Heat pump COP/SCOP = 4.06/3.77	Heat pump EER/SEER = 3.97/8.41	Heat pump COP = 4.10	---
Centralised with heat pump and solar thermal energy	Heat pump COP/SCOP = 4.06/3.77	Heat pump EER/SEER = 3.97/8.41	Heat pump COP = 4.10	Solar thermal energy for domestic hot water
Centralised with heat pump and photovoltaic energy	Heat pump COP/SCOP = 4.06/3.77	Heat pump EER/SEER = 3.97/8.41	Heat pump COP = 4.10	Photovoltaic energy
Centralised with biomass boiler	Biomass boiler h = 1.07	---	Biomass boiler h = 1.07	---

Table 9: Characteristics of the proposed new systems

(Table 10) shows the total annual demands for heating, cooling and domestic hot water for each of the cases studied, for the total of the seven rows of dwellings, normalized by the conditioned floor surface. The energy demands for domestic hot water (DHW) are always the same, since the energy efficiency improvement measures applied to the thermal envelope of the dwellings do not influence them in any way. Therefore, they do not appear in the comparative graph (Figure 24).

CASE STUDY	TOTAL ENERGY DEMANDS (kWh/(m ² year))		
	HEATING	COOLING	DHW
Reference case	164.31	7.33	26.16
Renovation measure 01	118.30	13.25	26.16
Renovation measure 02	113.49	15.34	26.16
Renovation measure 03	110.92	15.30	26.16
Renovation measure 04	110.92	15.31	26.16
Renovation measure 05	113.27	15.47	26.16
Renovation measure 06	113.98	15.33	26.16
Renovation measure 07	111.12	15.28	26.16
Renovation measure 08	111.13	15.32	26.16
Renovation measure 09	113.66	15.46	26.16
Renovation measure 10	114.65	15.24	26.16
Renovation measure 11	124.80	9.33	26.16
Renovation measure 12	133.88	7.88	26.16
Renovation measure 13	129.44	8.64	26.16
Renovation measure 14	156.98	8.06	26.16
Renovation measure 15	156.94	8.91	26.16

Table 10: Total energy demands

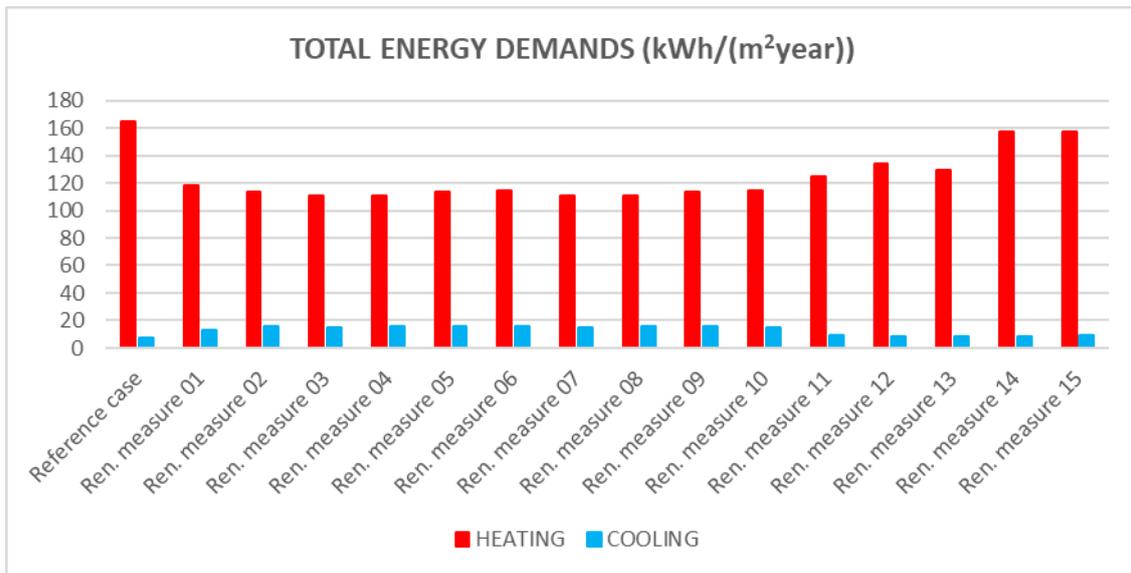


Figure 24: Total energy demands

It is observed how the energy demand for heating is, in all cases, much higher than the energy demand for cooling. This is due to the external conditions: the climate and the little solar capture, as a consequence of the small glazed area and the shadows received by the surrounding slopes.

Considering only the heating demands, as they are the main ones, it is observed that the best savings are achieved with the measures related to the insulation of façades

and projected floors, as they are the elements with the most surface area within the thermal envelope of the dwellings. Obviously, the quantity and quality of the thermal insulation used make a difference. The second biggest savings are achieved with interventions on sloping roofs, with a smaller surface area compared to façades. Finally, the lowest energy savings are achieved with the two measures proposed to replace the exterior carpentry, as they are the elements with the smaller presence in the thermal envelope.

Taking into account the energy saving approach provided by each of the proposed improvement renovation measures with respect to the reference case, but also the cost of each one of them throughout their lifetime, I have chosen five packages of renovation measures of energy efficiency according to the professors of the *Universidade do Minho*. All of them consist of three energy efficiency renovation measures relating to façades and projected floors, sloping roofs and exterior carpentry, respectively.

(Table 11) and (Figure 25) show their total annual demands for heating, cooling and domestic hot water for each of the packages studied, for the total of the seven rows of dwellings normalized by the conditioned floor surface.

CASE STUDY	TOTAL ENERGY DEMANDS (kWh/(m ² year))		
	HEATING	COOLING	DHW
Reference case	164.31	7.33	26.16
Package of renovation measures P1	99.15	8.61	26.16
Package of renovation measures P2	100.59	8.12	26.16
Package of renovation measures P3	84.86	8.98	26.16
Package of renovation measures P4	82.70	8.68	26.16
Package of renovation measures P5	95.11	8.76	26.16

Table 11: Total energy demands of the renovation measures packages

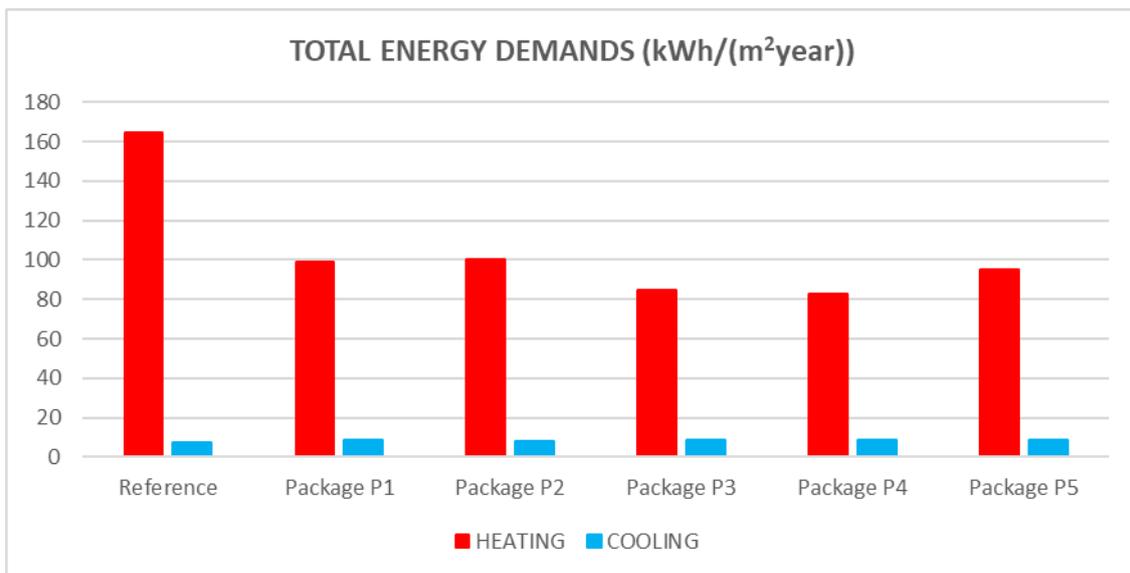


Figure 25: Total energy demands of the renovation measures packages

In the five proposals I have studied, the energy demands for cooling are much lower than the energy demands for heating, as was the case when studying the renovation measures separately. In addition, they present values that are very similar to each other, and slightly higher than in the reference case, due to the improvement of the thermal insulation of the dwellings. Regarding the energy demands for heating, in all cases significant energy savings are achieved compared to the reference case. The best package of renovation measures in this sense is P4, and the worst is P2.

4.3.10. Cost-effectiveness assessment.

I have complemented the study of energy efficiency for renovation measures and packages with an economic study, in order to know the optimal point from the cost-effectiveness approach.

In the reference case, I have proposed a series of improvement measures that do not aim to reduce demand, energy consumption or CO₂ emissions. For this reason, I have not had to do a new energy simulation since the results obtained would have been the same. These are maintenance measures necessary to restore the dwellings to their original state, using materials and technologies that are most similar to those used in their construction process, and that only affect the damaged parts:

- Façades and projected floors: repair of damaged mortar, mechanical cleaning and exterior painting.
- Sloping roofs: cleaning and repairing water leaks.
- Thermal bridges: no action.



- Exterior carpentry: replacement of damaged doors and windows and repair of the watertight joints between the exterior carpentry and the façades.
- Systems: replacement of water heaters and radiators, keeping electricity as the energy vector.
- Renewable energies: no action.

For the economic assessment of each of the energy efficiency renovation measures, I have considered both the cost of the new work units to be incorporated, and the cost of the maintenance actions to be carried out in the areas where no improvements are made. For instance, in a renovation measure that affects the façades and projected floors, in addition to the cost of these new units, I have considered the maintenance cost of the sloping roofs, the exterior carpentry and the systems.

I have made a detailed measurement of all the parts of the thermal envelope of the seven rows of dwellings in order to budget for the renovation measures. To find the decomposed prices for commissioning and maintenance costs of all work units, including maintenance, I have used the price base [27] as it is the source usually used by professors at the *Universidade do Minho* [21].

In (Table 12) and (Figure 26) I present, as a comparative summary, the total investment costs necessary to implement the work units related to the thermal envelope in the reference case and in the renovation measures. These values include the intervention in the set of the seven rows of dwellings.

It can be observed that the intervention measures on the façades and projected floors (01-10) are the most costly, especially those that involve the placement of ventilated façades (01-02). The intervention measures in sloping roofs (11-13) and in exterior carpentry (14-15) have a lower cost, and with similar values between them. It is also important to note that the reference case entails some necessary maintenance costs, although they do not imply any energy improvement, so the absence of improvements is not cost-free.

CASE STUDY	TOTAL INVESTMENT COST (€)
Reference case	161,608.63
Renovation measure 01	711,744.29
Renovation measure 02	665,756.89
Renovation measure 03	689,653.47
Renovation measure 04	682,434.06
Renovation measure 05	542,014.27
Renovation measure 06	535,186.89
Renovation measure 07	581,067.44
Renovation measure 08	576,828.95
Renovation measure 09	484,677.97
Renovation measure 10	480,330.80
Renovation measure 11	291,945.51
Renovation measure 12	258,029.26
Renovation measure 13	232,214.39
Renovation measure 14	260,080.17
Renovation measure 15	229,753.84

Table 12: Total investment costs for the reference case and renovation measures

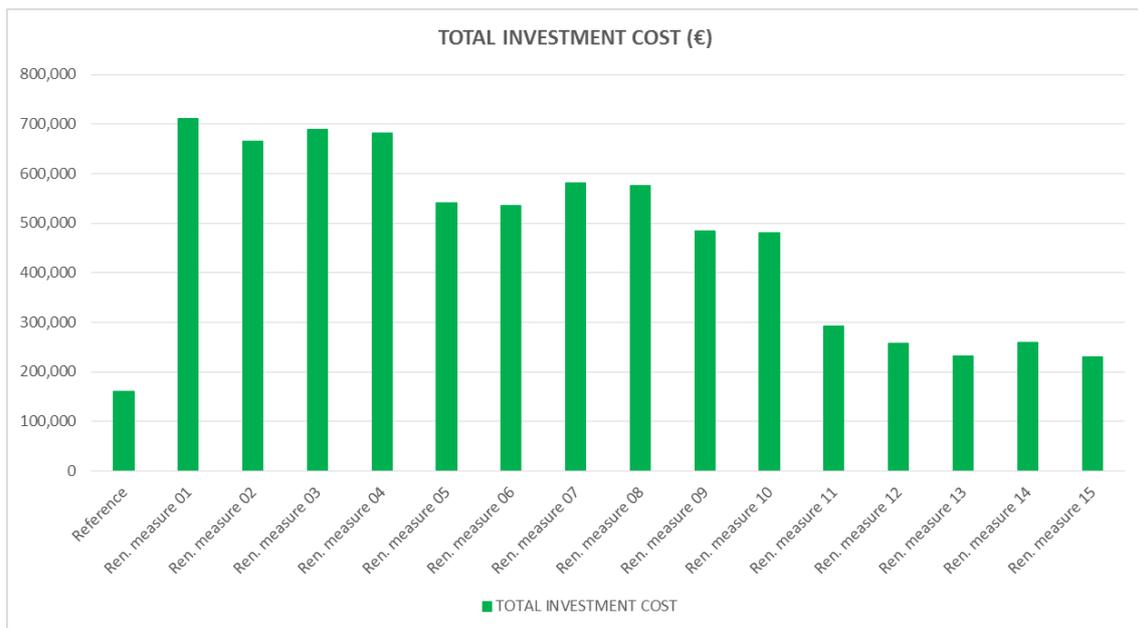


Figure 26: Total investment costs

I have assembled this detailed and comparative budget for the fifteen measures and the five energy efficiency renovation packages in a spreadsheet, created by the professors of the *Universidade do Minho* previously to carry out this type of cost-effectiveness assessments. This calculation tool is based on the Regulation [28] and is used to compare the rehabilitation solution of a reference building where there is an



intervention, but without improving energy performance, with measures to improve energy performance, considering a certain period of time.

In the CTAC [20], the calculations are made considering a period of thirty years, for two different perspectives:

- The social perspective considers the costs of carbon emissions and does not consider VAT values. For this perspective, a discount rate of 3 % is considered.
- From a private perspective, the discount rate is considered to be 6 %, VAT is included, and the costs of carbon emissions are not accounted for.

Subsequently, the professors of the *Universidade do Minho* have completed the study by implementing the five packages of renovation measures related to the thermal envelope and maintenance that I had generated, the five options related to the new systems and the use of renewable energy. Thus, twenty-five new case studies appear, where they have also taken into account other economic factors such as energy, maintenance and operation costs, rates for greenhouse gas emissions, the prices of the different energy vectors and their evolution, as well as the discount rate, all for an estimated lifetime of thirty years.

The set of this work described in the previous paragraphs has constituted my R&D&I contribution to the project and, within my participation in the Annex 75 project [22], it has given rise to this publication in which other participating researchers as well as professors from the *Universidade do Minho* have taken part.

- *Jon Terés-Zubiaga, Roman Bolliger, Manuela G. Almeida, Ricardo Barbosa, Jørgen Rose, Kirsten E. Thomsen, Eduardo Montero and Raúl Briones-Llorente. Cost-effective building renovation at district level combining energy efficiency & renewables – Methodology assessment proposed in IEA-Annex 75 and a demonstration case study. Energy & Buildings. 2020, 110280. June 2020. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110280.*

This publication appears in "**Annex 4**" of this Doctoral Thesis.



4.3.11. Life cycle assessment.

The professors of the *Universidade do Minho* [21] have provided me with data on some of the impacts produced by the main construction materials used in each of the work units proposed for the renovation and maintenance measures, taking into account their life cycles, calculated with SimaPro [29]:

- Equivalent CO₂ emissions (kg CO₂ eq.).
- Total embedded primary energy (kWh).
- Non-renewable embedded primary energy (kWh).

My work in this area has consisted on taking the detailed measurements of the renovation measures and the reference case that I used in the cost-effectiveness study, as well as designing a spreadsheet to assign to each renovation measure and package the three environmental impacts described.

CAPÍTULO 5

Indicadores de calidad de la Tesis



En ese apartado voy a exponer los indicadores de calidad de: (i) las publicaciones indexadas; (ii) las contribuciones a congresos; (iii) los proyectos de I+D+i, vinculados a la realización de esta Tesis Doctoral.

5.1. Publicaciones indexadas.

Raúl Briones-Llorente, Verónica Calderón, Sara Gutiérrez-González, Eduardo Montero and Ángel Rodríguez. **Testing of the Integrated Energy Behavior of Sustainable Improved Mortar Panels with Recycled Additives by Means of Energy Simulation.** *Sustainability*. 11(11):3117. Junio 2019. DOI: 10.3390/su11113117:

- Número de citas del artículo (*Scopus*): 3.

JOURNAL CITATION REPORTS OF WEB OF SCIENCE, 2019		
CAMPO	CUARTIL	POSICIÓN DE LA REVISTA
<i>Green & sustainable science & technology</i>	Q3	26/41
<i>Environmental sciences</i>	Q2	120/265

Raúl Briones-Llorente, Ricardo Barbosa, Manuela Almeida, Eduardo Atanasio Montero García and Ángel Rodríguez Saiz. **Ecological Design of New Efficient Energy-Performance Construction Materials with Rigid Polyurethane Foam Waste.** *Polymers*. 2020, 12, 1048. Mayo 2020. DOI: 10.3390/polym12051048:

JOURNAL CITATION REPORTS OF WEB OF SCIENCE, 2019		
CAMPO	CUARTIL	POSICIÓN DE LA REVISTA
<i>Polymer science</i>	Q1	16/89

Jon Terés-Zubiaga, Roman Bolliger, Manuela G. Almeida, Ricardo Barbosa, Jørgen Rose, Kirsten E. Thomsen, Eduardo Montero and Raúl Briones-Llorente. **Cost-effective building renovation at district level combining energy efficiency & renewables – Methodology assessment proposed in IEA-Annex 75 and a demonstration case study.** *Energy & Buildings*. 2020, 110280. Junio 2020. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110280:

JOURNAL CITATION REPORTS OF WEB OF SCIENCE, 2019		
CAMPO	CUARTIL	POSICIÓN DE LA REVISTA
<i>Construction and building technology</i>	Q1	7/63
<i>Energy and fuels</i>	Q2	31/112
<i>Engineering, Civil</i>	Q1	5/134



5.2. Contribuciones en congresos.

Raúl Briones, Fernando Aguilar, Ángel Rodríguez, Verónica Calderón and Eduardo Montero. **Study of the impact on energy demand due to the use of new opaque panels with recycled additives on curtain walls on an office building.** 31st International conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems ECOS 2018, celebrada en Guimarães (Portugal) del 17 al 21 de junio de 2018:

- Congreso ECOS: 32 ediciones desde 1987.
- Revisión por pares ciegos.
- *Proceedings* con ISBN: 978-972-99596-4-6.
- Indexado en *Scopus*.

Raúl Briones-Llorente, Eduardo A. Montero García, Verónica Calderón Carpintero, Sara Gutiérrez-González and Ángel Rodríguez Sáiz. **Use of recycled industrial waste for the development of energy efficient and sustainable façade panels.** 13th Conference on Advanced Building Skins ABS 2018, celebrada en Bern (Suiza) del 1 al 2 de octubre de 2018:

- Congreso ABS: 15 ediciones desde 2006.
- Revisión por pares ciegos.
- *Proceedings* con ISBN: 978-3-9524883-4-8.

Raúl Briones-Llorente, Fernando Feijoo and Eduardo Montero. **Thermal coherence of concave spaces formed by various airnodes with coupling by means of TRNSYS.** 14th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics HEFAT 2019, celebrada en Wicklow (Irlanda) del 22 al 24 de julio de 2019:

- Congreso HEFAT: 14 ediciones desde 2002.
- Revisión por pares ciegos.
- *Proceedings* con ISBN: 978-1-77592-191-2.



5.3. Proyectos de I+D+i.

Modelización energética de dependencias del Hospital Universitario de Burgos mediante herramientas de simulación y evaluación de eficiencia energética:

- Período: 2016 – 2020.
- Importe (€): 54.450 €.
- IP: Eduardo Montero García (Universidad de Burgos).
- Entidad financiadora: NUEVO HOSPITAL DE BURGOS S.A., (EFICANZA), Burgos.
- Grupo de Investigación de Ingeniería Energética de la Universidad de Burgos.

Conglomerados aligerados sostenibles de altas prestaciones, para su uso en Sistemas SATE:

- Período: 2018.
- Importe (€): 8.000 €.
- IP: Ángel Rodríguez Saiz (Universidad de Burgos).
- Programa de financiación y referencia del proyecto: Concurso Desafío Universidad-Empresa.
- Entidad financiadora: Junta de Castilla y León / Fundación de Universidades y Enseñanzas Superiores de Castilla y León / Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Grupo de Investigación de Ingeniería de la Edificación de la Universidad de Burgos. Unidad de Investigación Consolidada 256 de Castilla y León.
- Grupo de Investigación de Ingeniería Energética de la Universidad de Burgos.



Prefabricados de altas prestaciones termo mecánicas mediante la utilización de morteros diseñados con adiciones de residuos industriales valorizados:

- Período: 2018 – 2020.
- Importe (€): 21.175 €.
- IP: Ángel Rodríguez Saiz (Universidad de Burgos).
- Programa de financiación y referencia del proyecto: V Convocatoria Prueba Concepto 2018.
- Entidad financiadora: Fundación Universidades Castilla y León /Junta de Castilla y León / FEDER.
- Grupo de Investigación de Ingeniería de la Edificación de la Universidad de Burgos. Unidad de Investigación Consolidada 256 de Castilla y León.
- Grupo de Investigación de Ingeniería Energética de la Universidad de Burgos.

***IEA EBC Annex 75 - Cost-effective Building Renovation at District Level
Combining Energy Efficiency & Renewables:***

- Período: 2017 – 2022.
- IP: Manuela Almeida (*Universidade do Minho*).
- Programa de financiación y referencia del proyecto: *Energy in Buildings and Communities Programme*.
- Entidad financiadora: *International Energy Agency*.
- *CTAC (Research Centre in Territory, Environment and Construction). Universidade do Minho. Guimarães (Portugal)*.

CAPÍTULO 6

Conclusiones y futuros trabajos



6.1. Conclusiones.

Mediante mi participación en los distintos proyectos de I+D+i expuestos en esta Tesis, he podido contribuir a diseñar estrategias para mejorar la eficiencia energética de los edificios, mediante su análisis exhaustivo con técnicas avanzadas de simulación energética y, una vez conocido su estado actual, proponer medidas de mejora de su eficiencia energética técnica, funcional y económicamente viables.

En todas las aportaciones realizadas, y en especial en aquellas de evaluación energética de nuevos materiales de construcción, que incluyen elementos reciclados procedentes de desechos industriales, he tenido en cuenta una perspectiva de economía circular a lo largo de todo el ciclo de vida de los edificios, combinando su eficiencia energética y la reducción en el uso de materias primas, de energía, y de generación de nuevos residuos. Esto implica un compromiso medioambiental de sostenibilidad, tanto para las personas de la generación actual como para las de las futuras generaciones.

1. He hecho un estudio del estado del arte de los programas de simulación energética de edificios que se utilizan a nivel internacional, para centrarme después en los tres programas empleados en los proyectos de I+D+i vinculados a esta Tesis Doctoral: *TRNSYS®*, Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC) y *SG SAVE (Open Studio)*.
2. He planteado un estudio cualitativo teniendo en cuenta las distintas fases de utilización de dichos programas, reflejando sus puntos fuertes y débiles, fruto de mi conocimiento adquirido con su manejo en los proyectos de I+D+i vinculados a esta Tesis Doctoral, así como en experiencias previas profesionales y formativas. Para justificar el cumplimiento de la normativa energética española y/o realizar la certificación energética del edificio, concluyo que *SG SAVE (Open Studio)* es el programa más adecuado por su sencillez. Para hacer análisis energéticos más avanzados, concluyo que *TRNSYS®* y *SG SAVE (Open Studio)* son los mejores programas gracias a su potencia de cálculo. Finalmente, en cuanto a disponibilidad, concluyo que la Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC) y *SG SAVE (Open Studio)* son los programas más indicados al ser acceso libre y uso gratuito.
3. He realizado en el programa *TRNSYS®*, una mejora del análisis de espacios adyacentes separados por paredes virtuales, para resolver el problema surgido con su acoplamiento térmico. Consiste en un estudio comparativo de temperaturas

interiores de una zona térmica formada por dos *airnodes*, y una zona térmica equivalente formada por un solo *airnode*, declarando distintos flujos de recirculación de aire entre los dos *airnodes* de la primera zona térmica, obteniendo las siguientes conclusiones: (i) se logran temperaturas más coherentes entre espacios adyacentes estableciendo acoplamientos de flujo de aire elevados entre ellos, al igual que se estabilizan las demandas de calefacción y refrigeración; (ii) con esta solución se supera la limitación provocada por una pared virtual entre dos espacios, que permite el paso de radiación solar pero no el intercambio de calor por conducción y convección.

4. He utilizado técnicas de simulación energética en los proyectos de I+D+i vinculados a la Tesis Doctoral, lo que me ha permitido validar la utilización de nuevos materiales de construcción fabricados con residuos industriales valorizados como alternativa a los materiales tradicionales, ofreciendo prestaciones técnicas y de uso equivalentes y manteniendo el criterio de no empeoramiento. De esta forma, se consigue un beneficio ambiental al reducir el consumo de materias primas, de la energía primaria para su transformación y de las consiguientes emisiones de CO₂, contribuyendo a un desarrollo sostenible que apueste por la economía circular.
5. He simulado el comportamiento energético de nuevos paneles modulares para fachadas fabricados con morteros dosificados con residuos industriales valorizados, entre ellos espumas rígidas de poliuretano PU, como elementos integrantes de la fachada de un edificio, para verificar el cumplimiento de la normativa energética española. He comprobado que presentan un comportamiento térmico al menos igual que otros materiales tradicionales tales como la fábrica de ladrillo cara vista o los paneles de hormigón, tanto en un estudio anual de demanda energética, como en un estudio detallado de temperatura superficial interior de las paredes.
6. He simulado el comportamiento energético de nuevos paneles de mortero de cemento dosificados con áridos naturales y residuos industriales valorizados, escoria de acería EAF y espuma de poliuretano PU, como elementos integrantes en el exterior o en el interior de la fachada de un edificio, para verificar el cumplimiento de la normativa energética española. He comprobado que presentan un comportamiento térmico al menos igual que otros materiales tradicionales como el aplacado de piedra o los paneles de cartón yeso, respectivamente, según el estudio anual de demanda energética que he realizado. También, que contribuyen



- al aumento de la inercia térmica de las fachadas cuando se colocan por el interior, y que no generan condensaciones independientemente de dónde estén colocados.
7. He realizado la caracterización gráfica, constructiva y operacional de los siete edificios que forman el distrito del *Complexo Habitacional Picoto*, situado en la ciudad de *Braga* (Portugal), así como su simulación energética con *SG SAVE (Open Studio)* en su estado actual.
 8. He diseñado quince medidas de mejora de la envolvente térmica de dichos edificios basados en el refuerzo del aislamiento térmico de sus elementos pasivos en las diferentes zonas que la componen: (i) fachadas y suelos en voladizo; (ii) tejados inclinados; (iii) puentes térmicos; (iv) carpinterías exteriores. Influye, lógicamente, la cantidad y la calidad del aislamiento térmico empleado. He realizado la simulación energética con *SG SAVE (Open Studio)* de la aplicación de estas quince medidas de mejora en los siete edificios objeto de este proyecto de I+D+i.
 9. En colaboración con los profesores de la *Universidade do Minho*, he generado cinco paquetes de medidas de mejora de la envolvente térmica, que incluyen medidas para cada parte de la misma. Y, combinándolas con propuestas de mejora de las instalaciones diseñadas por ellos, tendentes al implemento de energías renovables, he realizado una nueva campaña de simulaciones energéticas con *SG SAVE (Open Studio)* para estos paquetes de mejora.
 10. He calculado un presupuesto detallado de cada medida y paquete de mejora de la eficiencia energética, para poder abordar el enfoque de coste-efectividad en este estudio, que ha sido completado por los profesores de la *Universidade do Minho* con otras variables económicas.
 11. He concluido que los mejores ahorros energéticos se consiguen con las medidas vinculadas al aislamiento de fachadas y los suelos en voladizo, por ser los elementos con más superficie dentro de la envolvente térmica de las viviendas. Los segundos mayores ahorros se consiguen con las intervenciones en los tejados inclinados, con menor superficie si se comparan con las fachadas. Por último, con las medidas propuestas para sustituir las carpinterías exteriores, se consiguen los menores ahorros energéticos por ser los elementos con menor presencia en la envolvente térmica.
 12. Desde el punto de vista económico, he concluido que las medidas de intervención en las fachadas y en los suelos en voladizo son las más costosas, especialmente las que implican la colocación de fachadas ventiladas. Las medidas de intervención en los tejados inclinados y en las carpinterías exteriores tienen un coste menor, y



con valores similares entre ellas. También es importante destacar que el caso de referencia no implica la gratuidad al no hacer nada, sino que conlleva unos costes de mantenimiento necesarios, aunque no impliquen ninguna mejora energética.

6.2. Futuros trabajos.

El Grupo de Investigación de Ingeniería de la Edificación de la Universidad de Burgos continúa desarrollando materiales de construcción sostenibles basados en la adición de residuos procedentes de la industria. Desde el punto de vista de la I+D+i, es interesante realizar estudios complementarios para otros materiales, en la misma línea de los ya realizados mediante simulación energética, para conocer su comportamiento al ser incorporados a un edificio, así como estudios de detalle de distintas variables térmicas. Además, sería importante incorporar a estos estudios el análisis de ciclo de vida de dichos materiales, para poder evaluar no sólo el consumo energético y las emisiones de CO₂ de los edificios en que son incorporados durante su etapa de explotación, sino también durante todo su ciclo de vida, en contraste con el uso de los materiales más tradicionales a los que pueden sustituir.

Respecto al proyecto de I+D+i para el estudio de coste-efectividad a nivel de distrito de medidas de eficiencia energética combinadas con energías renovables, sería conveniente profundizar en el estudio de ciclo de vida de cada una de la medidas y paquetes de medidas de mejora de la eficiencia energética estudiados. Así, se podrá ver la influencia de tener en cuenta, o no, el consumo de energía primaria y las emisiones de CO₂ de los materiales y equipos propuestos durante su ciclo de vida, además de los propios del *Complejo Habitacional Picoto* durante su periodo de explotación. También, sería interesante transferir este conocimiento y metodología a los grupos investigadores de la Universidad de Burgos, para en un futuro, poder utilizar este método de análisis de coste-efectividad para evaluar alguna intervención a nivel de distrito en la ciudad de Burgos, ya que muchas de las rehabilitaciones energéticas que he conocido durante mi vida profesional han seguido criterios meramente económicos, a veces influenciados por intereses particulares de las empresas colocadoras de los aislamientos térmicos y de los tomadores de decisiones en las comunidades de propietarios, y sin ningún soporte con base técnica o científica. Este método de estudio de coste-efectividad, aunque todavía está en desarrollo, parece responder al objetivo planteado de poder proporcionar orientación a los responsables políticos, a las empresas que trabajan en el campo de la transición energética, a los técnicos especialista en construcción y a los propietarios de edificios, para transformar



de manera rentable el actual modelo de uso de energía en el parque de edificios existentes en las ciudades, mediante soluciones de bajas emisiones y bajo consumo de energía.

Otra nueva línea de actuación que sería de gran interés implementar, es el estudio de los edificios en su estado actual y el diseño de medidas de mejora de su eficiencia energética mediante la aplicación del estándar *Passivhaus*, que se basa en cinco principios básicos de la arquitectura pasiva: (i) excelente aislamiento térmico; (ii) ventanas y puertas de altas prestaciones; (iii) ausencia de puentes térmicos; (iv) hermeticidad al aire; (v) ventilación mecánica con recuperación de calor. Dispone además de su propio *software* para calcular el comportamiento térmico del edificio. Sería un complemento perfecto a los estudios de simulación energética, pues aportaría medidas de mejora de la demanda energética de gran alcance, para poder conseguir edificios con consumo de energía casi nulo (*ZNEB*).

Por último, otro enfoque que abriría nuevas perspectivas en esta línea de investigación es la influencia del cambio climático en el comportamiento energético de los edificios. Actualmente, los edificios se diseñan teniendo en cuenta los condicionantes climáticos externos definidos por un año meteorológico tipo, correspondiente a la localidad en la que están ubicados. Pero teniendo en cuenta la vida útil de un edificio, y los distintos escenarios previstos para la evolución del clima, puede ocurrir que el diseño de un edificio sea correcto para la época en la que es concebido, pero no tanto para un futuro a medio y largo plazo. Contar con estudios de este tipo, a partir de la generación de archivos meteorológicos para los programas de simulación energética basados en dichas previsiones, permitiría diseñar edificios más resilientes y adaptables a nuevos escenarios y, por tanto, menos consumidores de energía.

CHAPTER 6

Conclusions and future works

6.1. Conclusions.

With my participation in the different R&D&I projects outlined in this Thesis, I have contributed to design strategies to improve the energy efficiency of buildings, by means of their exhaustive analysis using advanced energy simulation techniques and, once found out their current state, I have proposed measures to improve their energy efficiency, being technical, functional and economically feasible.

I have taken into account a perspective of circular economy throughout the entire life cycle of buildings, combining energy efficiency and the reduction in the use of raw materials, energy, and the generation of new waste in all the contributions made, and especially in those of the energy evaluation of new construction materials which include recycled elements from industrial waste. This implies an environmental commitment to sustainability, both for the people of the current generation and for those of future generations.

1. I have performed a study of the state of the art of the buildings energy simulation programs that are used internationally, to later focus on the three programs used in the R&D&I projects linked to this Doctoral Thesis: TRNSYS®, *Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC)* and SG SAVE (Open Studio).
2. I have proposed a qualitative study taking into account the different phases of use of these programs, reflecting their strengths and weaknesses, as a result of my knowledge acquired through their handling in the R&D&I projects linked to this Doctoral Thesis, as well as in previous professional and training experiences. To justify compliance with Spanish energy regulations and/or carry out the building's energy certification, I conclude that SG SAVE (Open Studio) is the most appropriate program due to its simplicity. For more advanced energy analysis, I conclude that TRNSYS® and SG SAVE (Open Studio) are the best programs thanks to their computing power. Finally, availability-wise, I conclude that the *Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC)* and SG SAVE (Open Studio) are the most indicated programs as they are both free access and free use.
3. I have carried out, in the TRNSYS® software, an improvement in the analysis of adjacent spaces separated by virtual walls, to solve the problem that arose with their thermal coupling. It consists of a comparative study of the interior temperatures of a thermal zone formed by two airnodes, and an equivalent thermal zone formed by a single airnode, declaring different air recirculation flows between the two airnodes of the first thermal zone, obtaining the following conclusions:



- (i) more coherent temperatures between adjacent spaces are achieved by establishing high air-flow couplings between them, and heating and cooling demands are stabilized as well; (ii) with this solution the limitation caused by a virtual wall between two spaces, which allows the passage of solar radiation but not the exchange of heat by conduction and convection, is overcome.
4. I have used energy simulation techniques in R&D&I projects linked to the Doctoral Thesis, which has allowed me to validate the use of new construction materials made from valued industrial waste as an alternative to traditional materials, offering equivalent technical and use performance and maintaining the criterion of no worsening. Thus, an environmental benefit is achieved by reducing the consumption of raw materials, the primary energy for their transformation and the consequent CO₂ emissions, contributing to a sustainable development that is committed to the circular economy.
 5. I have simulated the energy behaviour of new modular panels for façades manufactured with mortars dosed with recovered industrial waste, including rigid polyurethane foams PU, as integral elements of the facade of a building, to verify compliance with Spanish energy regulations. I have verified that they have a thermal behaviour at least equal to as other traditional materials such as face brick masonry or concrete panels, both in an annual energy demand study, and in a detailed study of the inner surface temperature of the walls.
 6. I have simulated the energy behaviour of new cement mortar panels dosed with natural aggregates and recovered industrial waste, steel slag EAF and polyurethane foam PU, as integral elements on the outside or inside of the facade of a building, to verify compliance with Spanish energy regulations. I have verified that they have a thermal behaviour at least equal to other traditional materials such as stone cladding or plasterboard panels, respectively, according to the annual energy demand study that I have carried out. Also, that they contribute to the increase in the thermal inertia of the facades when they are placed inside, and that they do not generate condensation regardless of where they are placed.
 7. I have carried out the graphic, constructive and operational characterization of the seven buildings that form the *Complejo Habitacional Picoto* district, located in the city of *Braga* (Portugal), as well as their energy simulation with SG SAVE (Open Studio) in their current state.
 8. I have designed fifteen measures to improve the thermal envelope of said buildings based on reinforcing the thermal insulation of their passive elements in the different



areas that comprise it: (i) façades and projected floors; (ii) sloping roofs; (iii) thermal bridges; (iv) exterior carpentry. The quantity and quality of the thermal insulation used is critical. I have carried out the energy simulation with SG SAVE (Open Studio) of the application of these fifteen improvement measures in the seven buildings that are the object of this R&D&I project.

9. I have generated five packages of measures to improve the thermal envelope, which include measures for each part of it, in collaboration with the professors of the *Universidade do Minho*. Combining these packages with proposals designed by them to improve the facilities, aimed at implementing renewable energy, I have carried out a new campaign of energy simulations with SG SAVE (Open Studio) for these improvement packages.
10. I have calculated a detailed budget for each measure and package to improve energy efficiency, in order to address the cost-effectiveness approach in this study, which has been completed by the professors of the *Universidade do Minho* with other economic variables.
11. I have concluded that the best energy savings are achieved with the measures related to the insulation of façades and projected floors, as they are the elements with the most surface area within the thermal envelope of the houses. The second largest savings are achieved with interventions on sloping roofs, with a smaller surface area compared to facades. Finally, the lowest energy savings are achieved with the measures proposed to replace the exterior carpentry, as they are the elements with the least presence in the thermal envelope.
12. From the economic point of view, I have concluded that the intervention measures on the façades and projected floors are the most expensive, especially those that involve the installation of ventilated façades. The intervention measures on sloping roofs and exterior carpentry have a lower cost, and with similar values between them. It is also important to note that the reference case entails some necessary maintenance costs, although they do not imply any energy improvement, so the absence of improvements is not cost-free.



6.2. Future works.

The Building Engineering Research Group of the University of Burgos continues developing sustainable construction materials based on the addition of waste from industry. From the point of view of R&D&I, it is interesting to carry out complementary studies for other materials, in the same line of those already carried out by means of energy simulation, to assess their behaviour when incorporated into a building, as well as detailed studies of different thermal variables. In addition, it would be important to incorporate the life cycle analysis of these materials into these studies, in order to evaluate not only the energy consumption and CO₂ emissions of the buildings in which they are incorporated during their exploitation stage, but also throughout their life cycle, in contrast to the use of the more traditional materials that they can replace.

Regarding the R&D&I project for the cost-effectiveness study at the district level of energy efficiency measures combined with renewable energies, it would be convenient to deepen the life cycle assessment of each of the measures and packages of measures of energy efficiency improvement studied. Thus, it will be possible to see the importance of considering, or not, the consumption of primary energy and the CO₂ emissions of the materials and equipment proposed during their life cycle, in addition to those of the *Complejo Habitacional Picoto* district during its exploitation stage. Also, it would be interesting to transfer this knowledge and methodology to the research groups of the University of Burgos, to make possible a future use of this method of cost-effectiveness analysis to evaluate some intervention at the district level in the city of Burgos, since many of the energy renovations that I have known during my professional life have followed purely economic criteria, sometimes influenced by particular interests of the thermal insulation companies and decision makers in homeowners' associations, without any technical or scientific support. This cost-effectiveness study method, although it is still under development, seems to respond to the stated objective of being able to provide guidance to policy makers, companies working in the field of energy transition, specialist construction technicians and building owners, to profitably transform the current model of energy use in the existing building stock in cities, through low-emission and low-energy solutions.

Another new line of action that would be of great interest to implement is the study of buildings in their current state and the design of measures to improve their energy efficiency through the application of the *Passivhaus* standard, which is based on five basic principles of passive architecture: (i) excellent thermal insulation; (ii) high



performance windows and doors; (iii) no thermal bridges; (iv) air tightness; (v) mechanical ventilation with heat recovery. It also has its own software to calculate the thermal behaviour of the building. It would be a perfect complement to energy simulation studies, since it would provide far-reaching measures to improve energy demand, in order to achieve buildings with almost zero energy consumption (ZNEB).

Finally, another approach that would open up new perspectives in this line of research is the influence of climate change on the energy behaviour of buildings. Currently, buildings are designed considering the external climatic conditions defined by a typical meteorological year, corresponding to the location in which they are placed. But taking into account the lifetime of a building, and the different scenarios foreseen for the evolution of the climate, it may happen that the design of a building is correct for the time in which it is conceived, but not so much for the future in the middle and long term. Having studies of this type, based on the generation of meteorological files for energy simulation programs based on these forecasts, would allow the design of buildings that are more resilient and adaptable to new scenarios and, therefore, less energy-consuming.

CAPÍTULO 7

Financiación de la Tesis

Desde noviembre de 2018, he sido beneficiario de un Contrato Predoctoral de la Junta de Castilla y León, que finalizará el día 7 de junio de 2022. Dicho contrato está vinculado a la “Orden de 18 de diciembre de 2017, de la Consejería de Educación, por la que se convocan ayudas destinadas a financiar la contratación predoctoral de personal investigador, cofinanciadas por el Fondo Social Europeo”.

Este contrato predoctoral ha sido cofinanciado por parte de la Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León y del Programa Operacional del Fondo Social Europeo.



Además de la financiación principal, he obtenido estas otras ayudas económicas:

- **2017:** Convocatoria de ayudas para la participación en congresos y otras reuniones científicas para el desarrollo de Tesis Doctorales, Universidad de Burgos.
 - **Finalidad:** Asistencia al 10º Congreso Internacional de Ingeniería Termodinámica, celebrado en Lleida del 28 al 30 de junio de 2017.
 - **Importe concedido:** 80,00 €.
- **2018:** Convocatoria de ayudas para la participación en congresos y otras reuniones científicas para el desarrollo de Tesis Doctorales, Universidad de Burgos.
 - **Finalidad:** Asistencia a la 13th Conference on Advanced Building Skins, celebrada en Bern (Suiza) del 1 al 2 de octubre de 2018.
 - **Importe concedido:** 150,00 €.
- **2019:** Convocatoria de ayudas de viaje para intervenciones en congresos y otras reuniones científicas, Universidad de Burgos.
 - **Finalidad:** Asistencia a la 14th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, celebrada en Wicklow (Irlanda) del 22 al 24 de julio de 2019.
 - **Importe concedido:** 405,00 €.



- **2019:** Convocatoria de ayudas para formación a la carta del PDI, Universidad de Burgos.
 - **Finalidad:** Realización del “Curso de cálculo de puentes térmicos con *Therm*”.
 - **Importe concedido:** 48,00 €.

- **2019:** Convocatoria de ayudas para movilidad de alumnos de Doctorado de la Universidad de Burgos.
 - **Finalidad:** Realización de una estancia de investigación internacional de cuatro meses de duración, desde el 01/10/2019 hasta el 31/01/2020, en el *CTAC (Research Centre in Territory, Environment and Construction)* de la *Universidade do Minho*, en *Guimarães*, Portugal.
 - **Importe concedido:** 2.457,48 €.

CAPÍTULO 8

Actividades desarrolladas
durante el periodo
de Doctorado



Esta Tesis Doctoral la he desarrollado en el periodo comprendido entre los Cursos Académicos 2016/2017 y 2019/2020, dentro del Programa de Doctorado en Eficiencia Energética y Sostenibilidad en Ingeniería y Arquitectura.

Anteriormente, en el curso 2015/2016, y vinculado al Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales e Ingeniería Civil, cursé los seis Módulos de Actividades Transversales y el curso y la acreditación del nivel B2 de inglés. Al cambiarme al Programa de Doctorado en Eficiencia Energética y Sostenibilidad en Ingeniería y Arquitectura en el siguiente curso, 2016/2017, todas estas actividades formativas me fueron convalidadas por la Escuela de Doctorado de la Universidad de Burgos.

A continuación, voy a mostrar los Documentos de Actividades de Doctorando desde el curso 2015/2016 hasta el curso 2019/2020, que he enviado a la Escuela de Doctorado de la Universidad de Burgos al término de cada curso para su valoración por mi Tutor, Directores de Tesis y la Comisión Académica del Programa de Doctorado.

En cada uno de los documentos figura toda la actividad que he desarrollado en relación con mi formación doctoral, clasificada en distintas áreas. Quiero destacar que **durante los cursos 2015/2016, 2016/2017 y 2017/2018** estaba realizando mi **Tesis Doctoral a tiempo parcial** mientras trabajaba como Profesional Autónomo de la Arquitectura Técnica y de la Formación. Por eso, en los apartados “3. Estancia en empresas relacionadas con los estudios de doctorado” de los Documentos de Actividades de Doctorando correspondientes, he reflejado las actividades que he realizado como Profesional Autónomo que tienen relación con mi Tesis Doctoral.



DOCUMENTO DE ACTIVIDADES DEL DOCTORANDO¹		CURSO	SEGUNDO
Sistema documental: Programas de Doctorado regulados por el R.D. 99/11		AÑO ACADÉMICO	2015 / 2016
DOCTORANDO	Raúl Briones Llorente		
PROGRAMA	Tecnologías Industriales e Ingeniería Civil		
COORDINADOR	César Ignacio García Osorio		
FECHA de ADMISIÓN	08/05/2015		
FECHA de MATRÍCULA	16/10/2015		
TUTOR	Eduardo Montero García	Fecha de nombramiento	08/05/2015
DIRECTOR de TESIS	Eduardo Montero García	Fecha de nombramiento	08/05/2015
Fecha de presentación del COMPROMISO DE SUPERVISIÓN	30/07/2015		
Fecha de presentación del PLAN DE INVESTIGACIÓN	01/09/2015		
Fecha de presentación de la MEMORIA DE EJECUCIÓN DEL PLAN DE INVESTIGACIÓN	10/09/2015		
A PROPUESTA DE ACTIVIDADES A REALIZAR:			
<input checked="" type="checkbox"/>	1. Realización de actividades de formación transversal		
	<p>He cursado y superado los seis Módulos de las Actividades Transversales:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Módulo 1: Estrategia en Materia de Investigación y de Formación Doctoral de la Universidad de Burgos. • Módulo 2: Transferencia de conocimiento e innovación. • Módulo 3: Información bibliográfica y de autores. Bases de datos. Índices de calidad de revistas y publicaciones. Publicación en abierto. • Módulo 4: Tratamiento de datos cuantitativos. • Módulo 5: Expresión de la actividad científica. • Módulo 6: Investigación 2.0: Posibilidades de la red para la difusión de la investigación. <p>He cursado y obtenido la Acreditación Nivel B2 en Inglés, del curso organizado por el Centro de Lenguas Modernas de la Universidad de Burgos para la Escuela de Doctorado.</p> <p>He asistido a la Conferencia Inaugural "Verdad literaria y verdad histórica", impartida por Don Óscar Esquivias Galerón el 19 de febrero de 2016.</p>		
<input type="checkbox"/>	2. Estancias en otras Universidades, Institutos, Centros de investigación nacionales o extranjeros		



X	<p>3. Estancia en empresas relacionadas con los estudios de doctorado</p> <p>Estoy dado de alta como profesional autónomo, y he realizado las siguientes actividades relacionadas con mis estudios de Doctorado en Actividades Económicas:</p> <p>ARQUITECTO TÉCNICO:</p> <ul style="list-style-type: none">• Justificaciones del cumplimiento de los documentos DB HE-0 Limitación del consumo energético y DB HE-1 Limitación de la demanda energética, del Código Técnico de la Edificación, y elaboración de la Certificación de Eficiencia Energética de los siguientes proyectos:<ul style="list-style-type: none">○ Rehabilitación de un edificio para Centro Terapéutico Integral de Parkinson situado en el Paseo de los Comendadores 2 de Burgos.○ Adaptación de un edificio industrial para Tanatorio situado en el Polígono Industrial de Bayas, Parcela 1.3-1 de Miranda de Ebro, Burgos.○ 54 viviendas adosadas situadas en el Sector PP.1 de Alcorcón, Madrid. Informe de revisión de la simulación energética.○ Vivienda unifamiliar situada en la Calle Fuentona 2 de Hontoria del Pinar, Burgos.○ Edificio de oficinas para bodega en la Calle Sur 5 de Nava de Roa, Burgos.○ Rehabilitación del edificio de 23 viviendas situado en la Calle las Calzadas 32 de Burgos. Asistencia técnica para la realización de los trabajos.○ Vivienda unifamiliar situada en la Calle San Cristóbal 15 de Itero del Castillo, Burgos.○ Nave Industrial situada en la Avenida Pedernales 46-48 de Villagonzalo Pedernales, Burgos.○ Rehabilitación del edificio de 36 viviendas situado en la Avenida de Valencia 3 de Burgos.○ Edificio de 53 viviendas situado en la Unidad de Actuación 44.03 de Burgos.• Certificaciones de Eficiencia Energética de las siguientes viviendas:<ul style="list-style-type: none">○ Vivienda unifamiliar situada en la Calle Gómez Salazar 39 de Covarrubias, Burgos.○ Vivienda en bloque situada en la Calle Pablo Casals 19, 6º C de Burgos.○ Vivienda en bloque situada en la Calle Padre Silverio 3, 1º B de Burgos.○ Vivienda en bloque situada en la Calle Federico García Lorca 23, 3º 11 de Burgos.○ Vivienda en bloque situada en la Calle Lerma 4, 4º D de Burgos. <p>ENSEÑANZA: Funciones: elaboración del material docente e impartición de las clases.</p> <ul style="list-style-type: none">• Programa Herramienta Unificada LIDER-CALENER. Colegio de Arquitectos de Segovia. Duración: 27 horas. Segovia, del 5 al 14 de julio de 2016.• Programa Herramienta Unificada LIDER-CALENER. Colegio de Arquitectos de Burgos. Duración: 27 horas. Burgos, del 11 al 27 de abril de 2016.• Actualización: Programa CE3X. Colegio de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de Edificación de Burgos. Presencial y <i>online</i>. Duración: 3 horas. Burgos, 19 de febrero de 2016.• Actualización: Programa CE3X. Colegio de Arquitectos de Burgos. Duración: 3 horas. Burgos, 17 de febrero de 2016.• Actualización: Programa CE3X. Colegio de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de Edificación de Burgos. Presencial y <i>online</i>. Duración: 3 horas. Burgos, 12 de febrero de 2016.• Actualización: Programa CE3X. Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Asturias. Duración: 3 horas. Oviedo, 8 de febrero de 2016.• Actualización: Programa CE3X. Colegio de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de Edificación de Burgos. Presencial y <i>online</i>. Duración: 3 horas. Burgos, 29 de enero de 2016.• Actualización: Programa Herramienta Unificada LIDER-CALENER. Colegio de Arquitectos de Burgos. Duración: 4 horas. Burgos, 1 de octubre de 2016.
---	--



<input checked="" type="checkbox"/>	4. Asistencia a Cursos, Congresos, Jornadas, Seminarios avanzados y otras reuniones científicas nacionales o internacionales
	He asistido a un Curso de Introducción a TRNSYS 17 , organizado por el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Escuela Superior de Ingenieros de <i>Bizkaia</i> de la Universidad del País Vasco. Duración: 10 horas. 22 y 29 de abril de 2016.
<input type="checkbox"/>	5. Presentación oral o escrita de comunicaciones, ponencias y conferencias
<input type="checkbox"/>	6. Publicaciones en revistas u obras de carácter colectivo
<input type="checkbox"/>	7. Patentes, marcas, modelos de utilidad, diseños, invenciones o creaciones amparadas por la normativa de propiedad industrial o intelectual
<input type="checkbox"/>	8. Colaboraciones en prácticas docentes
<input checked="" type="checkbox"/>	9. Becas, ayudas o contratos relacionados con la investigación
	Contrato de colaboración técnica como consultor externo con el Departamento de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Burgos, para el Proyecto de Consultoría para la Realización de la Modelización Energética Teórica del Edificio del Hospital Universitario de Burgos (H.U.B.U.) . Desde el 21 de marzo de 2016, y continúa en la actualidad.
<input type="checkbox"/>	10. Actividades documentadas de divulgación científica
<input type="checkbox"/>	11. Otras actividades o aspectos merecedores de evaluación
B	INFORME ANUAL DE VALORACIÓN O SEGUIMIENTO DEL TUTOR DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS <i>(según modelo formalizado en la UBU, a cumplimentar por el Tutor/es)</i>
C	INFORME ANUAL DE VALORACIÓN O SEGUIMIENTO DEL DIRECTOR/ES DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS <i>(según modelo formalizado en la UBU, a cumplimentar por el Director/es de Tesis)</i>
D	INFORME DE EVALUACIÓN ANUAL DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA DE DOCTORADO <i>(según modelo formalizado en la UBU, a cumplimentar por la Comisión Académica del Programa de Doctorado)</i>



DOCUMENTO DE ACTIVIDADES DEL DOCTORANDO¹		CURSO	PRIMERO
Sistema documental: Programas de Doctorado regulados por el R.D. 99/11		AÑO ACADÉMICO	2016 / 2017
DOCTORANDO	Raúl Briones Llorente		
PROGRAMA	Eficiencia energética y sostenibilidad en ingeniería y arquitectura		
COORDINADOR	Eduardo Montero García		
FECHA de ADMISIÓN	18 de octubre de 2016		
FECHA de MATRÍCULA	3 de noviembre de 2016		
TUTOR	Eduardo Montero García	Fecha de nombramiento	18/10/2016
DIRECTOR de TESIS	Eduardo Montero García	Fecha de nombramiento	18/10/2016
Fecha de presentación del COMPROMISO DE SUPERVISIÓN		20 de febrero de 2017	
Fecha de presentación del PLAN DE INVESTIGACIÓN		20 de febrero de 2017	
A PROPUESTA DE ACTIVIDADES A REALIZAR:			
<input checked="" type="checkbox"/>	1. Realización de actividades de formación transversal		
	<p>He participado en las III Jornadas de Doctorandos de la Universidad de Burgos, celebradas en Burgos del 15 al 16 de diciembre de 2016:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Asistencia. • Moderador de la Quinta Sesión. • Ponente del artículo: "Aproximación a la simulación energética de una galería acristalada realizada con <i>TRNSYS</i> para su definición con la Herramienta Unificada LIDER – CALNER". 		
<input type="checkbox"/>	2. Estancias en otras Universidades, Institutos, Centros de investigación nacionales o extranjeros		



x	<p>3. Estancia en empresas relacionadas con los estudios de doctorado</p> <p>Estoy dado de alta como profesional autónomo, y he realizado las siguientes actividades relacionadas con mis estudios de Doctorado en Actividades Económicas:</p> <p>ARQUITECTO TÉCNICO:</p> <ul style="list-style-type: none">• Justificaciones del cumplimiento de los documentos DB HE-0 Limitación del consumo energético y DB HE-1 Limitación de la demanda energética, del Código Técnico de la Edificación, y elaboración de la Certificación de Eficiencia Energética de los siguientes proyectos:<ul style="list-style-type: none">○ Edificio de 6 viviendas situado en la Calle San Lesmes 4, de Burgos.○ Edificio de 16 viviendas y 1 hostel situado en la Calle Cardenal Benlloch 1, de Burgos.○ Edificio de 8 viviendas situado en la Calle San Lázaro 31 de Aranda de Duero, Burgos.○ Edificio de 23 viviendas situado en la Glorieta Ismael García Rámila 9, de Burgos.○ Edificio de 28 viviendas situado en la Glorieta Ismael García Rámila 10, de Burgos.○ Edificio de 23 viviendas situado en la Glorieta Ismael García Rámila 11, de Burgos.○ Edificio de 20 viviendas situado en la Calle Federico García Lorca 10, de Burgos.○ Edificio de 6 viviendas situado en la Calle Francisco Salinas 47, de Burgos.○ Colegio Blanca de Castilla situado en la Calle San Juan de Ortega 12, de Burgos.○ Edificio para Oficina de Turismo situado en la Calle Raimundo Obispo 12 de Caleruega, Burgos.○ Edificio de 25 viviendas situado en la Parcela R1 – 2C1 del Sector S-3 “Casa de la Vega”, de Burgos.○ Vivienda unifamiliar situada en la Calle Real 13 de Ura, Burgos.• Certificaciones de Eficiencia Energética de las siguientes viviendas:<ul style="list-style-type: none">○ Vivienda en bloque situada en el Paseo de los Pisones 18, 9º P, de Burgos.○ Vivienda en bloque situada en la Calle Sedano 4, 4º Izquierda, de Burgos.○ Vivienda en bloque situada en la Calle del Carmen 2, 8º B, de Burgos. <p>ENSEÑANZA: Funciones: elaboración del material docente e impartición de las clases.</p> <ul style="list-style-type: none">• Eficiencia y certificación energética. Técnicas de ahorro energético en la edificación. Universidad de Burgos. Instituto de Formación e Innovación Educativa. Convenio Marco de Cooperación entre la Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León y la Universidad de Burgos. Duración total: 15 horas, de las cuales he impartido 7,5 horas. Burgos, del 7 al 21 de febrero de 2017.
---	--



<input checked="" type="checkbox"/>	4. Asistencia a Cursos, Congresos, Jornadas, Seminarios avanzados y otras reuniones científicas nacionales o internacionales
	<p>He participado en las III Jornadas de Doctorandos de la Universidad de Burgos, celebradas en Burgos del 15 al 16 de diciembre de 2016:</p> <ul style="list-style-type: none">• Asistencia.• Moderador de la Quinta Sesión.• Ponente del artículo: "Aproximación a la simulación energética de una galería acristalada realizada con TRNSYS para su definición con la Herramienta Unificada LIDER – CALNER". <p>He participado en el 10 Congreso Internacional de Ingeniería Termodinámica, celebrado en Lleida del 28 al 30 de junio de 2017:</p> <ul style="list-style-type: none">• Asistencia.• Presentación en formato póster del artículo: "<i>The importance of the energy simulation in residential buildings refurbishment. A case study for a residential building in Burgos</i>". <p>He participado en la International conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, celebrada en San Diego (Estados Unidos de América) del 2 al 6 de julio de 2017:</p> <ul style="list-style-type: none">• Presentación en formato póster del artículo: "<i>Transient simulation of the influence of wind conditions on the airtightness of windows. A case study for a tertiary building</i>".
<input checked="" type="checkbox"/>	5. Presentación oral o escrita de comunicaciones, ponencias y conferencias
	Expuesto en el Punto 4 de este documento.
<input type="checkbox"/>	6. Publicaciones en revistas u obras de carácter colectivo
<input type="checkbox"/>	7. Patentes, marcas, modelos de utilidad, diseños, invenciones o creaciones amparadas por la normativa de propiedad industrial o intelectual
<input checked="" type="checkbox"/>	8. Colaboraciones en prácticas docentes
	Eficiencia y certificación energética. Técnicas de ahorro energético en la edificación. Universidad de Burgos. Instituto de Formación e Innovación Educativa. Convenio Marco de Cooperación entre la Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León y la Universidad de Burgos. Duración total: 15 horas, de las cuales he impartido 7,5 horas. Burgos, del 7 al 21 de febrero de 2017.
<input checked="" type="checkbox"/>	9. Becas, ayudas o contratos relacionados con la investigación
	Contrato de colaboración técnica como consultor externo con el Departamento de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Burgos, para el Proyecto de Consultoría para la Realización de la Modelización Energética Teórica del Edificio del Hospital Universitario de Burgos (H.U.B.U.) . Desde el 21 de marzo de 2016, y continúa en la actualidad.
<input type="checkbox"/>	10. Actividades documentadas de divulgación científica



x	11. Otras actividades o aspectos merecedores de evaluación
	<p>Participación en la convocatoria de 10 de noviembre de 2016 de la Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León, de ayudas destinadas a financiar contratación predoctoral de personal investigador, cofinanciadas por el Fondo Social Europeo:</p> <ul style="list-style-type: none">• Elaboración de toda la documentación necesaria.• Puntuación obtenida: 15,07 puntos sobre 20,00.• No he conseguido el contrato.
B	INFORME ANUAL DE VALORACIÓN O SEGUIMIENTO DEL TUTOR DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS <i>(según modelo formalizado en la UBU, a cumplimentar por el Tutor/es)</i>
C	INFORME ANUAL DE VALORACIÓN O SEGUIMIENTO DEL DIRECTOR/ES DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS <i>(según modelo formalizado en la UBU, a cumplimentar por el Director/es de Tesis)</i>
D	INFORME DE EVALUACIÓN ANUAL DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA DE DOCTORADO <i>(según modelo formalizado en la UBU, a cumplimentar por la Comisión Académica del Programa de Doctorado)</i>



DOCUMENTO DE ACTIVIDADES DEL DOCTORANDO¹		CURSO	SEGUNDO
Sistema documental: Programas de Doctorado regulados por el R.D. 99/11		AÑO ACADÉMICO	2017 / 2018
DOCTORANDO	Raúl Briones Llorente		
PROGRAMA	Eficiencia energética y sostenibilidad en ingeniería y arquitectura		
COORDINADOR	Eduardo Montero García		
FECHA de ADMISIÓN	18 de octubre de 2016		
FECHA de MATRÍCULA	3 de noviembre de 2016		
TUTOR	Eduardo Montero García	Fecha de nombramiento	18/10/2016
DIRECTOR de TESIS	Eduardo Montero García	Fecha de nombramiento	18/10/2016
Fecha de presentación del COMPROMISO DE SUPERVISIÓN	20 de febrero de 2017		
Fecha de presentación del PLAN DE INVESTIGACIÓN	20 de febrero de 2017		
Fecha de presentación de la MEMORIA DE EJECUCIÓN DEL PLAN DE INVESTIGACIÓN	20/07/2018		
A PROPUESTA DE ACTIVIDADES A REALIZAR:			
<input type="checkbox"/>	1. Realización de actividades de formación transversal		
<input type="checkbox"/>	2. Estancias en otras Universidades, Institutos, Centros de investigación nacionales o extranjeros		
<input checked="" type="checkbox"/>	3. Estancia en empresas relacionadas con los estudios de doctorado		
<p>Estoy dado de alta como profesional autónomo, y he realizado las siguientes actividades relacionadas con mis estudios de Doctorado, en la Actividad Económica de:</p> <p>ARQUITECTO TÉCNICO:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Justificaciones del cumplimiento de los documentos DB HE-0 Limitación del consumo energético y DB HE-1 Limitación de la demanda energética, del Código Técnico de la Edificación, y elaboración de la Certificación de Eficiencia Energética de los siguientes proyectos: <ul style="list-style-type: none"> ○ Vivienda unifamiliar situada en la Calle Colibrí 43 de Carcedo de Burgos, Burgos. ○ Edificio de 36 viviendas situado en la Avenida de Valencia 2 de Burgos. ○ Edificio de 24 viviendas situado en la Calle Romanceros 5 de Burgos. ○ Vivienda unifamiliar situada en la Calle Muérdago 10 de Aranda de Duero, Burgos. ○ Vivienda unifamiliar situada en la Calle Río Esgueva 20 de Burgos. • Certificaciones de Eficiencia Energética de las siguientes viviendas: <ul style="list-style-type: none"> ○ Vivienda unifamiliar situada en la Calle Timoteo Arnaiz 7 de Burgos. ○ Vivienda unifamiliar situada en la Calle Timoteo Arnaiz 9 de Burgos. ○ Vivienda unifamiliar situada en la Calle Río Urbel 11 de Burgos. 			



<input checked="" type="checkbox"/>	4. Asistencia a Cursos, Congresos, Jornadas, Seminarios avanzados y otras reuniones científicas nacionales o internacionales
	<p>He participado en el IV Congreso Edificios Energía Casi Nula, celebrado en Madrid del 13 al 14 de diciembre de 2017:</p> <ul style="list-style-type: none">• Asistencia.• Publicación del artículo: “¿Se están rehabilitando los edificios de viviendas con los criterios de EECN? Caso de estudio de cuatro edificios en Burgos”. <p>He participado en el I Congreso ITE+3R De la Inspección Técnica de Edificios a la Rehabilitación, Regeneración y Renovación Urbana, celebrado en Burgos del 23 al 24 de mayo de 2018:</p> <ul style="list-style-type: none">• Asistencia. <p>He participado en la International conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, celebrada en <i>Guimarães</i> (Portugal) del 17 al 21 de junio de 2018:</p> <ul style="list-style-type: none">• Publicación del artículo: “<i>Study of the impact on energy demand due to the use of new opaque panels with recycled additives on curtain walls on an office building</i>”. <p>He realizado el Curso Oficial de Passivhaus Designer / Consultant, celebrado en Burgos del 3 de mayo al 8 de junio, con una duración de 79 horas.</p>
<input checked="" type="checkbox"/>	5. Presentación oral o escrita de comunicaciones, ponencias y conferencias
	Expuesto en el Punto 4 de este documento.
<input type="checkbox"/>	6. Publicaciones en revistas u obras de carácter colectivo
<input type="checkbox"/>	7. Patentes, marcas, modelos de utilidad, diseños, invenciones o creaciones amparadas por la normativa de propiedad industrial o intelectual
<input type="checkbox"/>	8. Colaboraciones en prácticas docentes



X	9. Becas, ayudas o contratos relacionados con la investigación
	<p>Contrato de colaboración técnica como consultor externo para los siguientes proyectos:</p> <ul style="list-style-type: none">• 2018: RENDTEST. Aplicación para la determinación del rendimiento energético estacional de instalaciones de climatización en edificios. Importe (€): 14.169 €. Programa de Financiación y referencia del proyecto: V Convocatoria Prueba Concepto 2018. Entidad financiadora: Fundación Universidades Castilla y León / Junta de Castilla y León / FEDER. Grupo de Investigación de Ingeniería Energética de la Universidad de Burgos.• 2018: Prefabricados de altas prestaciones termo mecánicas mediante la utilización de morteros diseñados con adiciones de residuos industriales valorizados. Importe (€): 21.175 €. IP: Ángel Rodríguez Saiz. Programa de Financiación y referencia del proyecto: V Convocatoria Prueba Concepto 2018. Entidad financiadora: Fundación Universidades Castilla y León / Junta de Castilla y León / FEDER. Grupo de Investigación de Ingeniería Energética de la Universidad de Burgos.• 2017 – 2018: Módulos de fachada Trombe con bio-PCM y panel fotovoltaico para climatización de edificios. Importe (€): 10.000 €. Programa de Financiación y referencia del proyecto: Lanzadera Universitaria de Proyectos con Empresas 2017. Entidad financiadora: Fundación Universidades Castilla y León / Junta de Castilla y León / FEDER. Grupo de Investigación de Ingeniería Energética de la Universidad de Burgos.• 2016 – 2018: Modelización energética de dependencias del Hospital Universitario de Burgos mediante herramientas de simulación y evaluación de eficiencia energética. Importe (€): 54.450 €. Entidad financiadora: NUEVO HOSPITAL DE BURGOS S.A., (EFICANZA), Burgos. Grupo de Investigación de Ingeniería Energética de la Universidad de Burgos.
	10. Actividades documentadas de divulgación científica
X	11. Otras actividades o aspectos merecedores de evaluación
	<p>Participación en la convocatoria de 18 de diciembre de 2017 de la Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León, de ayudas destinadas a financiar contratación predoctoral de personal investigador, cofinanciadas por el Fondo Social Europeo:</p> <ul style="list-style-type: none">• Elaboración de toda la documentación necesaria.• Puntuación obtenida: 15,89 puntos sobre 20,00.• No he conseguido el contrato.
B	INFORME ANUAL DE VALORACIÓN O SEGUIMIENTO DEL TUTOR DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS



(según modelo formalizado en la UBU, a cumplimentar por el Tutor/es)

C

INFORME ANUAL DE VALORACIÓN O SEGUIMIENTO DEL DIRECTOR/ES DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS *(según modelo formalizado en la UBU, a cumplimentar por el Director/es de Tesis)*

D

INFORME DE EVALUACIÓN ANUAL DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA DE DOCTORADO
(según modelo formalizado en la UBU, a cumplimentar por la Comisión Académica del Programa de Doctorado)



DOCUMENTO DE ACTIVIDADES DEL DOCTORANDO¹		CURSO	TERCERO
Sistema documental: Programas de Doctorado regulados por el R.D. 99/11		AÑO ACADÉMICO	2018 / 2019
DOCTORANDO	Raúl Briones Llorente		
PROGRAMA	Eficiencia energética y sostenibilidad en ingeniería y arquitectura		
COORDINADOR	Eduardo Montero García		
FECHA de ADMISIÓN	18 de octubre de 2016		
FECHA de MATRÍCULA	3 de noviembre de 2016		
TUTOR	Eduardo Montero García	Fecha de nombramiento	18/10/2016
DIRECTOR de TESIS	Eduardo Montero García	Fecha de nombramiento	18/10/2016
Fecha de presentación del COMPROMISO DE SUPERVISIÓN	20 de febrero de 2017		
Fecha de presentación del PLAN DE INVESTIGACIÓN	20 de febrero de 2017		
Fecha de presentación de la MEMORIA DE EJECUCIÓN DEL PLAN DE INVESTIGACIÓN	20/07/2018		
A PROPUESTA DE ACTIVIDADES A REALIZAR:			
<input type="checkbox"/>	1. Realización de actividades de formación transversal		
<input type="checkbox"/>	2. Estancias en otras Universidades, Institutos, Centros de investigación nacionales o extranjeros		
<input checked="" type="checkbox"/>	3. Estancia en empresas relacionadas con los estudios de doctorado		
<p>He estado dado de alta como profesional autónomo hasta el 18/11/2018, y he realizado las siguientes actividades relacionadas con mis estudios de Doctorado, en las Actividades Económicas de:</p> <p>ARQUITECTO TÉCNICO:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Certificaciones de Eficiencia Energética de las siguientes viviendas: <ul style="list-style-type: none"> ○ Vivienda en bloque en la Avenida de Valencia 7 de Burgos. <p>ENSEÑANZA:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Profesor del Curso de Eficiencia Energética en Edificios: <ul style="list-style-type: none"> ○ Módulo 1: Introducción y conceptos generales. 9 horas. ○ Módulo 4: Programa Herramienta Unificada LIDER – CALENER. 27 horas. Colegio Oficial de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de Edificación de Burgos. Funciones: Preparación de materiales docentes e impartición del curso a 36 alumnos, en Burgos y en modalidad <i>online</i>. • Ponente de la Jornada sobre el uso del CE3X para edificios nuevos: Colegio Oficial de Arquitectos de Burgos. Funciones: Preparación de materiales docentes e impartición de la jornada a 23 alumnos, en Burgos. 2 horas. • Ponente de la Jornada sobre el uso del CE3X para edificios nuevos: Colegio Oficial de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de Edificación de Burgos. Funciones: Preparación de materiales docentes e impartición de la jornada a 10 alumnos, en Burgos. 2 horas. 			



X	4. Asistencia a Cursos, Congresos, Jornadas, Seminarios avanzados y otras reuniones científicas nacionales o internacionales
	<p>He participado en la 14th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, celebrada en <i>Wicklow</i> (Irlanda) del 22 al 24 de julio de 2019:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Asistencia. • Presentación de póster. • Publicación del artículo: <i>“Thermal coherence of concave spaces formed by various airnodes with coupling by means of TRNSYS”</i>. <p>He participado en la 32th International conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, celebrada en <i>Wroclaw</i> (Polonia) del 23 al 28 de junio de 2019:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Presentación de póster. • Publicación del artículo: <i>“Strategies of energy refurbishment on the basis of energy simulation focused on the zero net energy buildings. Study case of a single-family house in Spain”</i>. <p>He participado en la 13th Conference on Advanced Building Skins, celebrada en <i>Bern</i> (Suiza) del 1 al 2 de octubre de 2018:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Asistencia. • Presentación oral. • Presentación de póster. • Publicación del artículo: <i>“Use of recycled industrial waste for the development of energy efficient and sustainable façade panels”</i>. <p>He asistido a la Jornada sobre el DB HE0 y el DB HE1 del CTE de 2019, celebrado en modalidad <i>online</i> por la empresa <i>Efinovatic</i>, el 28 de marzo, con una duración de 1,5 horas.</p> <p>He asistido al Curso Avanzado de SG SAVE (Open Studio), celebrado en modalidad <i>online</i> por la empresa <i>Efinovatic</i>, del 4 de febrero al 4 de marzo, con una duración de 30 horas.</p>
X	5. Presentación oral o escrita de comunicaciones, ponencias y conferencias
	Expuesto en el Punto 4 de este documento.
X	6. Publicaciones en revistas u obras de carácter colectivo
	<p>Publicación del artículo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Raúl Briones-Llorente, Verónica Calderón, Sara Gutiérrez-González, Eduardo Montero and Ángel Rodríguez. Testing of the Integrated Energy Behavior of Sustainable Improved Mortar Panels with Recycled Additives by Means of Energy Simulation. <i>Sustainability</i>. 11(11):3117. Junio 2019. DOI: 10.3390/su11113117.
	7. Patentes, marcas, modelos de utilidad, diseños, invenciones o creaciones amparadas por la normativa de propiedad industrial o intelectual



X	8. Colaboraciones en prácticas docentes
	<p>El 19/11/2018 comienzo a trabajar como PDI contratado predoctoral en el Departamento de Ingeniería Electromecánica al serme concedida una Beca PREDOC de la Junta de Castilla y León en su convocatoria de 2017, y he realizado las siguientes labores docentes en el Curso Académico 2018 - 2019:</p> <ul style="list-style-type: none">• Asignatura: Ingeniería Energética (101) – Máster Universitario en Ingeniería Industrial – 6 horas.• Asignatura: Eficiencia Energética (7668) – Máster Universitario en Inspección, Rehabilitación y Eficiencia Energética en la Edificación – 4 horas.• Asignatura: Trabajo Fin de Grado (6342) – Grado en Ingeniería Mecánica – 25 horas.
X	9. Becas, ayudas o contratos relacionados con la investigación
	<p>He obtenido un contrato predoctoral de la Convocatoria PREDOC 2017 de la Junta de Castilla y León para trabajar como PDI contratado en el Departamento de Ingeniería Electromecánica. Además de la labor docente expuesta en el Punto 8, he colaborado en los siguientes proyectos de investigación:</p> <ul style="list-style-type: none">• 2018 – 2020: Nuevos sistemas de materiales de almacenamiento de energía de origen renovable para edificios medioambientalmente eficientes. Importe (€): 12.000 €. IP: Eduardo Montero García. Programa de Financiación y referencia del proyecto: Subvenciones de apoyo a los grupos de investigación reconocidos de universidades públicas de Castilla y León. Entidad financiadora: Junta de Castilla y León. Grupo de Investigación de Ingeniería Energética de la Universidad de Burgos.• 2018: Prefabricados de altas prestaciones termo mecánicas mediante la utilización de morteros diseñados con adiciones de residuos industriales valorizados. Importe (€): 21.175 €. IP: Ángel Rodríguez Saiz. Programa de Financiación y referencia del proyecto: V Convocatoria Prueba Concepto 2018. Entidad financiadora: Fundación Universidades Castilla y León / Junta de Castilla y León / FEDER. Grupo de Investigación de Ingeniería Energética de la Universidad de Burgos.• 2016 – 2019: Modelización energética de dependencias del Hospital Universitario de Burgos mediante herramientas de simulación y evaluación de eficiencia energética. Importe (€): 54.450 €. Entidad financiadora: NUEVO HOSPITAL DE BURGOS S.A., (EFICANZA), Burgos. Grupo de Investigación de Ingeniería Energética de la Universidad de Burgos.
	10. Actividades documentadas de divulgación científica



X	11. Otras actividades o aspectos merecedores de evaluación
	He realizado entre el 4 de febrero y el 4 marzo de 2019 el trabajo de probador de las nuevas versiones SG SAVE v.2.7.1.0. y SG SAVE v.2.7.1.1. del programa <i>SG SAVE</i> para la empresa <i>Efinovatic</i> , sin recibir por ello ningún tipo de contraprestación.
B	INFORME ANUAL DE VALORACIÓN O SEGUIMIENTO DEL TUTOR DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS <i>(según modelo formalizado en la UBU, a cumplimentar por el Tutor/es)</i>
C	INFORME ANUAL DE VALORACIÓN O SEGUIMIENTO DEL DIRECTOR/ES DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS <i>(según modelo formalizado en la UBU, a cumplimentar por el Director/es de Tesis)</i>
D	INFORME DE EVALUACIÓN ANUAL DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA DE DOCTORADO <i>(según modelo formalizado en la UBU, a cumplimentar por la Comisión Académica del Programa de Doctorado)</i>



DOCUMENTO DE ACTIVIDADES DEL DOCTORANDO¹		CURSO	CUARTO
Sistema documental: Programas de Doctorado regulados por el R.D. 99/11		AÑO ACADÉMICO	2019 / 2020
DOCTORANDO	Raúl Briones Llorente		
PROGRAMA	Eficiencia energética y sostenibilidad en ingeniería y arquitectura		
COORDINADOR	Eduardo Montero García		
FECHA de ADMISIÓN	18 de octubre de 2016		
FECHA de MATRÍCULA	3 de noviembre de 2016		
TUTOR	Eduardo Montero García	Fecha de nombramiento	18/10/2016
DIRECTOR de TESIS	Eduardo Montero García	Fecha de nombramiento	18/10/2016
Fecha de presentación del COMPROMISO DE SUPERVISIÓN	20 de febrero de 2017		
Fecha de presentación del PLAN DE INVESTIGACIÓN	20 de febrero de 2017		
Fecha de presentación de la MEMORIA DE EJECUCIÓN DEL PLAN DE INVESTIGACIÓN	20/07/2018		
A PROPUESTA DE ACTIVIDADES A REALIZAR:			
<input type="checkbox"/>	1. Realización de actividades de formación transversal		
<input checked="" type="checkbox"/>	2. Estancias en otras Universidades, Institutos, Centros de investigación nacionales o extranjeros		
	<p>Estancia internacional de cuatro meses de duración, desde el 01/10/2019 hasta el 31/01/2020, en el CTAC (Research Centre in Territory, Environment and Construction) de la Universidade do Minho, en Guimarães, Portugal.</p> <p>Trabajo en colaboración con la profesora Manuela Almeida, directora del Grupo de Construcción del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidade do Minho.</p> <p>Participación en el proyecto IEA EBC Annex 75 - Cost-effective Building Renovation at District Level Combining Energy Efficiency & Renewables, de la Agencia Internacional de la Energía.</p>		
<input type="checkbox"/>	3. Estancia en empresas relacionadas con los estudios de doctorado		



X	4. Asistencia a Cursos, Congresos, Jornadas, Seminarios avanzados y otras reuniones científicas nacionales o internacionales
	<p>He participado en el 11th International Conference on European Transnational Educational, celebrado en Burgos del 16 al 18 de septiembre de 2020:</p> <ul style="list-style-type: none">• Publicación del artículo: <i>"The Impact of International Mobility in Doctoral Training in Novel Research Groups: a Case Study"</i>. <p>He asistido al Curso de cálculo de puentes térmicos con THERM, celebrado en modalidad <i>online</i> por la empresa <i>Efinovatic</i>, del 4 de octubre al 15 de octubre de 2019, con una duración de 12 horas.</p> <p>He asistido a la Jornada: Cambios reglamentarios en el CTE. Nuevo Documento de Ahorro de Energía, celebrada en modalidad <i>online</i> por el Instituto Eduardo Torroja (CSIC), el 4 de febrero de 2020, con una duración de 1 hora.</p> <p>He asistido a la Jornada: CTE - HE 2019 y su verificación con CE3X, celebrada en modalidad <i>online</i> por la empresa <i>Efinovatic</i>, el 26 de marzo de 2020, con una duración de 1,5 horas.</p> <p>He asistido a la Jornada: Novedades en las herramientas de Calificación Energética de Edificios - HULC y SG SAVE, celebrada en modalidad <i>online</i> por la empresa <i>Efinovatic</i>, el 2 de abril de 2020, con una duración de 1,5 horas.</p> <p>He asistido a la Jornada: Salud, confort, eficiencia energética y sostenibilidad, celebrada en modalidad <i>online</i> por la empresa Siber Ventilación Inteligente, el 7 de abril de 2020, con una duración de 2 horas.</p> <p>He asistido al Curso de formación de Active Presenter, celebrado en modalidad <i>online</i> por el Instituto de Formación e Innovación Educativa (IFIE), el 20 de abril de 2020, con una duración de 1 hora.</p> <p>He asistido a la Jornada: Análisis de la carga parcial de una caldera de biomasa con SG SAVE, celebrada en modalidad <i>online</i> por la empresa <i>Efinovatic</i>, el 7 de mayo de 2020, con una duración de 1 hora.</p> <p>He asistido a la Jornada: Complementos CE3X para la verificación de los requisitos del nuevo CTE: iCONNECTA + iANALIZA, celebrada en modalidad <i>online</i> por la empresa <i>Efinovatic</i>, el 13 de mayo de 2020, con una duración de 2 horas.</p> <p>He asistido a la Jornada: Paso a paso en el diseño y dimensionado de los sistemas de ventilación, celebrada en modalidad <i>online</i> por la empresa Siber Ventilación Inteligente, el 26 de mayo de 2020, con una duración de 1 hora.</p> <p>He asistido a la Jornada: CYPE BIM server centre education, celebrada en modalidad <i>online</i> por la empresa CYPE Ingenieros, el 5 de junio de 2020, con una duración de 1 hora.</p>



<input checked="" type="checkbox"/>	4. Asistencia a Cursos, Congresos, Jornadas, Seminarios avanzados y otras reuniones científicas nacionales o internacionales
	<p>He asistido al Curso de calentamiento global y adaptación al cambio climático, celebrado en modalidad <i>online</i> por UBU Verde de la Universidad de Burgos, del 8 de junio al 26 de junio de 2020, con una duración de 30 horas.</p> <p>He asistido al Curso de El entorno de UBU Virtual y su uso didáctico (Curso para PDI), celebrado en modalidad <i>online</i> por el Centro de Enseñanza Virtual de la Universidad de Burgos, del 1 de julio al 10 de julio de 2020, con una duración de 8 horas.</p> <p>He asistido al Curso de Presentación del Código de Buenas Prácticas en Investigación, y de nuevas acciones para promover la investigación en la Universidad de Burgos, celebrado en modalidad <i>online</i> por el Instituto de Formación e Innovación Educativa (IFIE), el 9 de julio de 2020, con una duración de 2 horas.</p>
<input checked="" type="checkbox"/>	5. Presentación oral o escrita de comunicaciones, ponencias y conferencias
	Expuesto en el Punto 4 de este documento.
<input checked="" type="checkbox"/>	6. Publicaciones en revistas u obras de carácter colectivo
	<p>Publicación de los artículos:</p> <ul style="list-style-type: none">• Raúl Briones-Llorente, Ricardo Barbosa, Manuela Almeida, Eduardo Atanasio Montero García and Ángel Rodríguez Saiz. <i>Ecological Design of New Efficient Energy-Performance Construction Materials with Rigid Polyurethane Foam Waste</i>. <i>Polymers</i>. 2020, 12, 1048. Mayo 2020. DOI: 10.3390/polym12051048.• Jon Terés-Zubiaga, Roman Bolliger, Manuela G. Almeida, Ricardo Barbosa, Jørgen Rose, Kirsten E. Thomsen, Eduardo Montero and Raúl Briones-Llorente. <i>Cost-effective building renovation at district level combining energy efficiency & renewables – Methodology assessment proposed in IEA-Annex 75 and a demonstration case study</i>. <i>Energy & Buildings</i>. 2020, 110280. Junio 2020. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110280.
<input type="checkbox"/>	7. Patentes, marcas, modelos de utilidad, diseños, invenciones o creaciones amparadas por la normativa de propiedad industrial o intelectual
<input checked="" type="checkbox"/>	8. Colaboraciones en prácticas docentes
	<p>El 19/11/2018 comienzo a trabajar como PDI contratado predoctoral en el Departamento de Ingeniería Electromecánica al serme concedida una Beca PREDOC de la Junta de Castilla y León en su convocatoria de 2017, y he realizado las siguientes labores docentes en el Curso Académico 2019 - 2020:</p> <ul style="list-style-type: none">• Asignatura: Ingeniería Energética (7044) – Máster Universitario en Ingeniería Industrial – 4 horas.• Asignatura: Mantenimiento e Inspección de las Edificaciones (6478) – Grado en Arquitectura Técnica – 12 horas.• Asignatura: Trabajo Fin de Grado (6475) – Grado en Arquitectura Técnica – 22 horas.



X	9. Becas, ayudas o contratos relacionados con la investigación
	<p>He obtenido un contrato predoctoral de la Convocatoria PREDOC 2017 de la Junta de Castilla y León para trabajar como PDI contratado en el Departamento de Ingeniería Electromecánica. Además de la labor docente expuesta en el Punto 8, he colaborado en los siguientes proyectos de investigación:</p> <ul style="list-style-type: none">• 2020: VISUALPHASE. Dispositivo para visualización de los procesos de fusión-solidificación en materiales de cambio de fase (PCMs). Importe (€):10.919 €. Programa de Financiación y referencia del proyecto: VII Convocatoria Prueba Concepto 2020. Entidad financiadora: Fundación Universidades Castilla y León / Junta de Castilla y León / FEDER. Grupo de Investigación de Ingeniería Energética de la Universidad de Burgos.• 2019 – 2020: IEA EBC Annex 75 – Cost-effective Building Renovation at District Level Combining Energy Efficiency & Renewables. Agencia Internacional de la Energía. <i>CTAC (Research Centre in Territory, Environment and Construction). Universidade do Minho. Guimarães (Portugal).</i>• 2018 – 2020: Nuevos sistemas de materiales de almacenamiento de energía de origen renovable para edificios medioambientalmente eficientes. Importe (€): 12.000 €. IP: Eduardo Montero García. Programa de Financiación y referencia del proyecto: Subvenciones de apoyo a los grupos de investigación reconocidos de universidades públicas de Castilla y León. Entidad financiadora: Junta de Castilla y León. Grupo de Investigación de Ingeniería Energética de la Universidad de Burgos.• 2016 – 2020: Modelización energética de dependencias del Hospital Universitario de Burgos mediante herramientas de simulación y evaluación de eficiencia energética. Importe (€): 54.450 €. Entidad financiadora: NUEVO HOSPITAL DE BURGOS S.A., (EFICANZA), Burgos. Grupo de Investigación de Ingeniería Energética de la Universidad de Burgos.
X	10. Actividades documentadas de divulgación científica
	<p>Participado en el programa del Bachillerato Investigación/Excelencia en Ciencias y Tecnología durante el curso 2019/2020, realizando la actividad titulada ¿Cómo se conoce el comportamiento energético de los fluidos? La combinación de ciencia, tecnología, ingeniería y matemática. Duración de 3 horas, y celebrado en dos institutos:</p> <ul style="list-style-type: none">• I.E.S. Félix Rodríguez de la Fuente. Burgos.• I.E.S. Comuneros de Castilla. Burgos.



<input type="checkbox"/>	11. Otras actividades o aspectos merecedores de evaluación
B	INFORME ANUAL DE VALORACIÓN O SEGUIMIENTO DEL TUTOR DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS <i>(según modelo formalizado en la UBU, a cumplimentar por el Tutor/es)</i>
C	INFORME ANUAL DE VALORACIÓN O SEGUIMIENTO DEL DIRECTOR/ES DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS <i>(según modelo formalizado en la UBU, a cumplimentar por el Director/es de Tesis)</i>
D	INFORME DE EVALUACIÓN ANUAL DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA DE DOCTORADO <i>(según modelo formalizado en la UBU, a cumplimentar por la Comisión Académica del Programa de Doctorado)</i>

CAPÍTULO 9

Agradecimientos



En este último apartado de mi Tesis Doctoral, quiero mostrar mi sincero agradecimiento a todas las entidades y personas que han hecho posible la realización de este trabajo de investigación:

- A la **Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León y al Programa Operacional del Fondo Social Europeo**, por la financiación recibida mediante la concesión de mi Contrato Predoctoral desde el día 19 de noviembre de 2018.
- A la **Universidad de Burgos**, por las ayudas económicas descritas en el apartado “7. Financiación de la Tesis”.
- A la **Escuela de Doctorado y al Servicio de Gestión de la Investigación de la Universidad de Burgos**, por el apoyo técnico recibido.
- A la empresa **EFICANZA S.A.**, por permitirme utilizar los resultados del proyecto de I+D+i para la modelización energética de dependencias del Hospital Universitario de Burgos, y a su personal técnico, con el que he colaborado estrechamente durante estos años.
- Aos professores da **Universidade do Minho: Manuela Almeida, Ricardo Barbosa e Ricardo Mateus**, por me terem permitido fazer um período de investigação no CTAC (Centro de Território, Ambiente e Construção), e por continuarem a contar comigo nos seus trabalhos de investigação. A estadia em Guimarães foi muito proveitosa para mim do ponto de vista profissional e pessoal, e o tratamento recebido foi inexcelável. Espero que possamos continuar a colaborar durante muitos anos.
- A mis **compañeras y compañeros de la Universidad de Burgos**: (i) Natalia Muñoz Rujas, Fernando Aguilar Romero, Francisco González Montalvo, Jesús Marcos García Alonso, Gabriel Rubio Pérez y Mohamed Lifi, **del Grupo de Investigación de Ingeniería Energética**; (ii) Fernando Feijoo García y Francisco Javier Gómez Gil, **del Área de Ingeniería Mecánica**; (iii) Verónica Calderón Carpintero y Sara Gutiérrez González, **del Grupo de Investigación de Ingeniería de la Edificación**, por haber colaborado conmigo en distintos proyectos de investigación, en la difusión de sus resultados, y por la convivencia diaria en la UBU y en los congresos.
- A las **profesoras y profesores de la Escuela Politécnica Superior del Vena y de la Milanera**: Eduardo Montero García, Fernando Aguilar Romero, Francisco González Montalvo, Ángel Rodríguez Saiz, Carlos Junco Petrement, Sara Gutiérrez González, Lourdes Alameda Cuenca Romero, Sara María Martínez



Azcona, María del Rosario Moradillo de las Heras, Alberto Fernando González del Barrio, José Manuel González Martín, José Ramón López García y Julián Agustín Herrero Canal, con quienes he compartido labores docentes durante estos dos últimos cursos.

- *A mi **Director de Tesis: Eduardo Montero García**. No sólo me has sabido guiar acertadamente durante mi etapa de formación Doctoral, antes durante el Máster, y finalmente, durante la elaboración de la Tesis, sino que siempre me has dado muy buenos consejos para enfocar mi carrera académica y profesional, a pesar de los impedimentos económicos y de disponibilidad que en muchas ocasiones tenía mientras trabajada como Autónomo y a la vez realizaba el Doctorado. Me has demostrado una generosidad y dedicación enormes, y por ello, sé que además de haber podido trabajar con un docente e investigador con grandes conocimientos y capacidades, he encontrado en ti a un verdadero amigo. Te deseo lo mejor para tu próxima etapa personal.*
- *A mi **Codirector de Tesis: Ángel Rodríguez Saiz**. Al igual que Eduardo, a pesar de soportar una carga de trabajo a veces inabarcable, siempre has sacado el tiempo necesario para ayudarme en los trabajos de investigación, en las publicaciones y en la labor docente, derrochando dedicación y generosidad. En lo personal también te has comportado como un buen amigo, así que espero que podamos seguir trabajando juntos en nuevos proyectos de ahora en adelante.*
- *A mis **padres: Isacio y Ángeles**. Toda la vida habéis trabajado mucho para que mis hermanos y yo tuviéramos la posibilidad de realizar estudios universitarios para poder alcanzar un nivel de vida mejor del que vosotros habéis tenido. Es sin duda, la mejor herencia que nos podéis dejar, y poder realizar Tesis Doctoral, es una muestra de lo bien que lo habéis hecho siempre.*
- *A mis **hermanos: Jesús y Carlos**. Mis mejores amigos y mis referentes para todo en la vida. Si soy Aparejador, es porque Jesús es Ingeniero de Obras Públicas, y si he iniciado la carrera investigadora, es porque Carlos es uno de los mejores investigadores en Astrobiología a nivel internacional. Qué suerte haber sido el hermano pequeño para recibir tan buenas influencias. Aquí, hago extensivo el agradecimiento a Montse, Eva, Julio, Miriam y Diego, por vuestro cariño y por los buenos momentos que hemos pasado.*



- A mi **pareja desde hace 21 años: Elo**. En todos estos años me has visto estudiar una Carrera Técnica, un Grado, un Máster y un Doctorado. También, vivir muchos vaivenes laborales por exceso de trabajo cuando era Jefe de Obra, o falta de él, sobre todo en mis años de Autónomo en medio de una crisis económica. Con todo ello, seguro que te he dejado de mostrar toda la atención que te mereces, y, sin embargo, has sido mi mejor amiga y mi más firme aliada en este difícil camino, con una integridad y una valentía sin comparación. Bien, esto que ahora consigo es gracias a ti y espero que con ello pueda afianzar una vida mejor para los dos. Aquí, hago extensivo el agradecimiento a Joaquín^(DEP), Eloísa, Joaquín y Alicia, por vuestro cariño y por los buenos momentos que hemos pasado.
- A mis **amigas y amigos**, que siempre me han apoyado en esta larga y difícil travesía laboral y académica, y a quienes muchas veces tampoco he podido atender como me hubiera gustado. Seguro que tenemos muchos buenos momentos por delante para encontrarnos.



¡Muchas gracias!

Thank you very much!

Muito obrigado!

ANEXO 1

Artículo:

“Thermal Coherence of Concave Spaces
Formed by Various Airnodes With
Coupling by Means Of TRNSYS”



HEFAT 2019

Wicklow, Ireland

22 – 24 July 2019



Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics

PROCEEDINGS

HEFAT 2019

**14th International Conference on
Heat Transfer, Fluid Mechanics
and
Thermodynamics**



ASTFE

American Society
of Thermal and Fluids Engineers





14th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics

FOREWORD TO THE CONFERENCE PROCEEDINGS OF THE 14TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HEAT TRANSFER, FLUID MECHANICS AND THERMODYNAMICS (HEFAT2019) IN WICKLOW, IRELAND FROM 22 TO 24 JULY 2019

The purpose of most conferences in this field, including this one, is to provide a forum for specialists in heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics from all corners of the globe to present the latest progress and developments in the field. This will not only allow for dissemination of the state of the art, but it will serve as a catalyst for discussions of future directions and priorities in the areas of heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics. Additionally, the purpose of this conference is to initiate collaboration in research.

In 2002, the 1st International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (HEFAT2002) was hosted in the Kruger National Park, South Africa. In 2003, the 2nd International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (HEFAT2003) was hosted at the Victoria Falls, Zambia. The 2004 conference (HEFAT2004) was held in Cape Town and the 4th conference (HEFAT2005) took place in Cairo, while the 5th conference (HEFAT2007) was held at Sun City, South Africa. The 6th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (HEFAT2008) took place in Pretoria. The 7th conference took place in Antalya, Turkey while the 8th one (HEFAT2010) was in Mauritius. The 2012 conference (HEFAT2012) was held in Malta and the 10th conference in Orlando, Florida. The 11th conference took place at the same venue where HEFAT started, namely in the Kruger National Park, South Africa, and the 12th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (HEFAT2016), was in Malaga, Spain. The 13th conference (HEFAT2017) was in Slovenia. This conference, the 14th International Conference in Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics is in Wicklow, Ireland.

The papers in these proceedings will be read over a period of three days from 22 to 24 July 2019, and six keynote papers will be presented. The large number of scheduled presentations will no doubt contribute towards creating a meaningful forum for discussing the latest developments as well as for keeping abreast of the state of the art in heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics.

For this conference and proceedings, all papers were peer-reviewed and 260 papers were accepted and published in the conference proceedings. All the papers in the proceedings will be uploaded onto the repository of the University of Pretoria (<http://repository.up.ac.za>) and will be freely available for dissemination. To improve dissemination, permission is also granted to all delegates to make available the proceedings on their websites and university repositories.

The review policy determined that only original research papers recommended by an independent reviewer, who is a distinguished subject specialist in the field of the relevant paper, and the Editor, were accepted. A list of all the reviewers who formed the Technical Programme Committee (TPC), and who participated in the review process is available on the TPC link: <https://www.eiseverywhere.com/ehome/349879/752636/>

A large number of papers were submitted, and I wish to express my sincere thanks to the reviewers whose generous efforts made it possible to select only papers of a high standard for publication in the proceedings. Papers were received from 646 authors representing 52 countries. The 10 countries with the most authors are Germany (52), India (47), France (46), Spain (42), China (40), Canada (38), Japan (34), Ireland (33), South Africa (31) and South Korea (31)



14th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics

As conference chair of HEFAT2019, I know that the success of the conference ultimately depends on the many people who have worked with us in the planning and organising of this conference. In particular, we thank the International Advisory Committee, Organising Committee, Technical Programme Committee, the reviewers who reviewed the papers, the company, Africa Massive (Pty) Ltd., which was responsible for all logistical arrangements, our sponsors (International Centre for Heat and Mass Transfer and the American Society for Thermal and Fluid Engineers), the session chairs, the keynote speakers and all the delegates who will present papers. All these people contributed to the success of this conference and the quality of these proceedings.

It is thus my pleasure to welcome you now to HEFAT2019 on behalf of the Organising Committee. I trust that this conference will reach the common objective of bringing together scientists and engineers, and of inspiring us to uncover, share and glean more knowledge in order to tackle humankind's future problems.

Prof JP Meyer

Editor: Proceedings of the 14th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (HEFAT2019)

Publisher: HEFAT

ISBN: 978-1-77592-191-2

Proceedings published date: 22 July 2019

**THERMAL COHERENCE OF CONCAVE SPACES FORMED BY VARIOUS
AIRNODES WITH COUPLING BY MEANS OF TRNSYS**

Briones-Llorente R.*, Feijoo F. and Montero E.

*Author for correspondence

Department of Electromechanical Engineering,
University of Burgos,
Escuela Politécnica Superior, Avenida de Cantabria s/n, Burgos,
Spain,
E-mail: rbriones@ubu.es**ABSTRACT**

Spaces with concave shape (U, T, E shape...) with inwards and outwards corners forming concavities are often present in residential and tertiary building energy simulations. In order to develop an energy simulation by means of TRNSYS package, the definition of the building energy zones is made by means of Google SketchUp adding the Trnsys3d plug-in. There is a limitation for the zones shape, which must be convex. Spaces must be then divided in two separated zones with a rectangular shape, and the concavity disappears. The wall which links both zones in fact does not exist, and it is treated as a virtual wall, like an auxiliary element of the drawing. When the created drawing is imported from TRNSYS for making a 3D Building Project (multizone), and the TRNBuild file (Type 56) is generated, virtual walls disappear from the surface list of both zones because they are auxiliary elements. Anomalies in the interior air temperatures of both zones which form the only space have been detected while developing hourly energy simulations, showing physical incoherence between the temperatures of both spaces. Several energy simulations have been performed changing the shape of the zones. The joining, or not, of both airnodes in a same zone, different air coupling scenarios both between zones and airnodes, and the passage of the solar radiation through the virtual wall have been also assessed. As a result, it has been observed that air coupling between airnodes with a particular air flow provides the best result. This method allows defining spaces joining both airnodes in a single zone with air coupling, with a suitable flow moving between both airnodes. A study case is presented, where different options are compared, and where temperatures coherence as a criterion of their validity is assessed.

INTRODUCTION

A tertiary building is being energy simulated by means of TRNSYS package [1]. A representative floor of this building has a rectangular shape, and it is formed by 69 spaces. 21 of them are T-shaped and have the same use, so they are crucial in this study.

This concave shape is an obstacle when working with Trnsys3d plug-in for Google SketchUp [2], because TRNSYS requires convex shapes to perform radiation balance between walls. A 3D model with zones with concave shapes must not be

imported to TRNSYS, in order to prevent computer errors. A way to solve this problem is to divide each T-shaped space in two rectangular shaped spaces. These new spaces are linked by a virtual wall which disappears when the 3D model is imported to TRNSYS and runs the TRNBuild file.

The simulation seeks to calculate the energy consumption of HVAC apart of heating and cooling demands. Room temperatures trigger the activation/deactivation of HVAC equipment and they are checked to verify if the required comfort temperatures are fulfilled.

This leads to review the spaces along the yearly hourly simulation. A big difference between zones separated by virtual walls has been observed when the HVAC systems are not working and the air temperature fluctuates free. These results show physical incoherence, since the virtual wall has disappeared and the two zones are now only one space without internal physical barriers, then the temperatures should be similar.

A literature review has been conducted to find similar cases in TRNSYS simulations, but none have been found. [3] is an interesting energy simulation study about the energy demand and the potential energy savings in a Spanish surgical building. In [4], a new TRNSYS numerical module for modelling PCM-enhanced wall has been developed and validated using experimental results. In [5], a new model for walls with phase change materials implemented in TRNSYS is developed and validated. [6] is a study of the thermal demand of a tertiary building in Italy with two retrofitting purposes: improved thermal envelope and high efficient windows. In [7], coupled energy, airflow and indoor air quality software (TRNSYS/CONTAM) is used to evaluate building ventilation strategies.

In order to understand this behaviour, a complete study has been performed with numerous energy simulations, both of a T-shaped space and a rectangular shaped space with equivalent area and the same dimensions for its single façade. The joining, or not, of two zones or two airnodes in a same zone, different air coupling scenarios both between zones and airnodes, and the passage of the solar radiation through the virtual wall have also been assessed.

NOMENCLATURE

C_p	[J/(kgK)]	Specific heat
g	[-]	Solar factor
P	[m ³ /(hm ²)]	Permeability under a lab pressure of 100 Pa
R_n	[(m ² K)/W]	Layer thermal resistance
T	[°C]	Temperature
t	[m]	Thickness
U	[W/m ² K]	Thermal transmittance

Special characters

α	[-]	Solar absorptance
δ	[kg/m ³]	Density
λ	[W/mK]	Thermal conductivity

Subscripts

n	Number of layer
-----	-----------------

MATERIALS AND METHODS

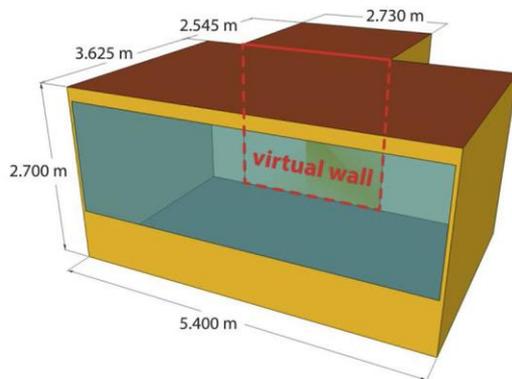
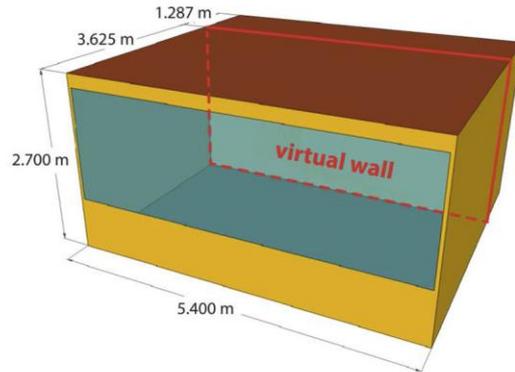
In this study, a representative T-shaped room has been energy simulated. This space belongs to a hospital built just before the approval of [8], and according with the previous Spanish Saving Energy Code [9] from 1979.

A rectangular shape room has been simulated to raise the differences between simulation with and without virtual walls. As this space has no concavities, results should be very similar in both cases.

The simulations have been made by means of Transient System Simulation package (TRNSYS v.17) [1] a well-known software used to simulate the behaviour of transient systems, such as buildings. TRNSYS is made up of two parts. The first one reads and processes the input file, iteratively solves the system, determines convergence, and plots system variables. The second part is an extensive library of components, each of which models the performance of one part of the system.

Building geometry

The energy simulations have been developed in two ways. First, with the real shape of the space, T-shaped, which dimensions are shown in Figure 1. Second, with a rectangular shaped space which dimensions are shown in Figure 2.


Figure 1 T-shaped 3D model and dimensions

Figure 2 Rectangular shaped 3D model and dimensions

Both spaces have the same volume, and are divided in two zones. The inner virtual wall is remarked in red. The main outer zone with a window has the same shape, volume (52.85 m³) and dimensions in both cases. The inner zone has the same volume (18.76 m³) but different shape.

The first case is formed by two zones, and it must not be generated as a single space because it would be concave.

However, the second case is formed by two zones too, but it can be generated as a single space because it would be convex. Thus, a comparative study could be carried out.

Building constructive features

The room's enclosures and interior partitions have been identified and generated in layers ordered from the inside to the outside with TRNSYS. In the same way, the window has also been generated based on technical features of the glass and the metallic frame supplied by the makers. In this case, the thermal bridges have not been taken into account.

The thermophysical properties of the exterior wall, the floor, the ceiling, the interior partitions and the window are shown in Tables 1 to 5.

The solar absorptance value (α) has been defined for all of the exterior enclosures and frames, taking into account their colours and according with [8].

Material	t , m	λ , W/(mK)	C_p , J/(kgK)	δ , kg/m ³	R_n , (m ² K)/W
Plasterboard	0.013	0.250	1,000	825	---
Felt	0.010	0.060	1,300	200	---
MW insulation	0.060	0.031	1,000	40	---
Steel	0.008	50.000	450	7,800	---
MW insulation	0.020	0.041	1,000	40	---
Ventilated air chamber	0.100	---	---	---	0.095
Slate cladding	0.040	2.200	1,000	2,400	---

Table 1 Opaque ventilated façade ($U = 0.342$ W/m²K)

14th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics

Material	t_s m	λ_s W/(mK)	C_p J/(kgK)	δ_s kg/m ³	R_{m_s} (m ² K)/W
Terrazzo	0.020	1.300	1,000	1,700	---
Cement mortar	0.080	0.700	1,000	1,350	---
EPS insulation	0.080	0.029	1,000	30	---
Reinforced concrete	0.300	2.500	1,000	2,600	---

Table 2 Exterior floor ($U = 0.314$ W/m²K)

Material	t_s m	λ_s W/(mK)	C_p J/(kgK)	δ_s kg/m ³	R_{m_s} (m ² K)/W
Plasterboard	0.013	0.250	1,000	825	---
Non-ventilated air chamber	1.000	---	---	---	1.800
Reinforced concrete	0.300	2.500	1,000	2,600	---
Cement mortar	0.080	0.700	1,000	1,350	---
Terrazzo	0.020	1.300	1,000	1,700	---

Table 3 Interior adiabatic ceiling ($U = 0.440$ W/m²K)

Material	t_s m	λ_s W/(mK)	C_p J/(kgK)	δ_s kg/m ³	R_{m_s} (m ² K)/W
Plasterboard	0.013	0.250	1,000	825	---
Plasterboard	0.013	0.250	1,000	825	---
MW insulation	0.060	0.050	1,000	40	---
Plasterboard	0.013	0.250	1,000	825	---
Plasterboard	0.013	0.250	1,000	825	---

Table 4 Interior adiabatic partition ($U = 0.634$ W/m²K)

Material	t_s m	U_s W/(m ² K)	α_s dimensionless	g_s dimensionless
Aluminium without thermal bridge	0.060	2.269	0.650	---
Low emissivity glass with air chamber (4/15/4)	0.023	1.430	---	0.605

Table 5 Window's frame and glazing

The window air permeability is: $P = 3$ m³/(hm²) under a lab pressure of 100 Pa.

Both the air permeability and the thermal bridges have not been taken into account in this study, so the thermal exchange is due only to the exterior enclosures and the window.

Systems and building operational conditions

This study case has been assessed in two scenarios:

- Calculation of energy demands with a set point heating temperature (low) of 20 °C and a set point cooling temperature (high) of 26 °C.
- Calculation without set points (no energy demands are calculated). The air temperature is allowed to fluctuate free.

Climatic conditions

The study case is located in Burgos in the North of Spain. Its latitude is 42°17'10" North and its longitude is 3°27'22" West. Its altitude above the sea level is 861 meters. This place has one of the most severe climates in winter in Spain, according with [8]. The monthly average air temperature is shown in Table 6.

Monthly average air temperature, °C											
Ja	Fe	Ma	Ap	Ma	Ju	Ju	Au	Se	Oc	No	De
3.1	4.1	7.0	8.6	12.2	16.5	19.5	19.5	16.1	11.5	6.6	3.9

Table 6 Monthly average air temperatures in Burgos

Zones and airnodes

The T-shaped room 3D model must be generated using Trnsys3d from two linked rectangular volumes, in order to avoid concavities. Afterwards, they are imported from TRNSYS and their constructive characteristics are described in TRNBuild. Both parts of the space are automatically generated as two independent thermal zones (with a single airnode in each one) separated by a virtual wall. This is the first scenario assessed by energy simulation where incoherence between temperatures in each zone has been observed. This incoherence has led us to further investigations and to realize that the virtual wall between both zones is opaque to the solar radiation.

Taking into account these problems a second scenario has been assessed using an option allowed by TRNSYS. The T-shape space is modelled as one thermal zone with 2 airnodes. Only the main thermal zone is maintained, and the airnode of the other zone is moved there. Thus, the space has a single thermal zone with two airnodes linked by a virtual wall which, is expected to be transparent to solar radiation.

TRNSYS allows the coupling to define airflow between airnodes in the same zone [10]. Several cases have been simulated with different air coupling values looking for the convergence of the airnodes air temperature, as far as we understand that two adjacent spaces belonging to the same room should have a similar temperature.

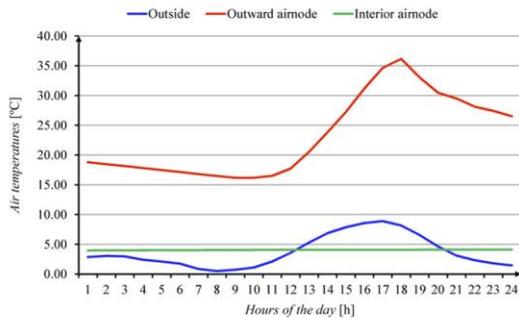
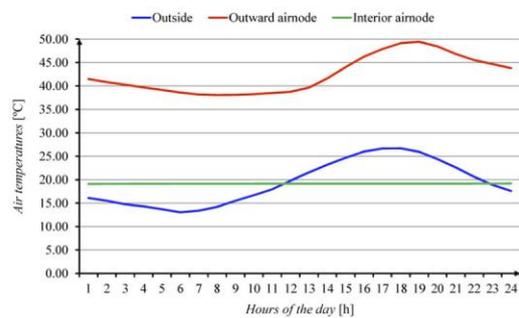
These cases have also been assessed for the rectangular shaped space, in order to compare and validate the obtained results. Besides, this space has been studied in an additional case, as a single rectangular thermal zone with a single airnode. As it has no concavities, there will not be virtual wall nor air coupling, and the obtained results will be the most reliable.

RESULTS AND DISCUSSION

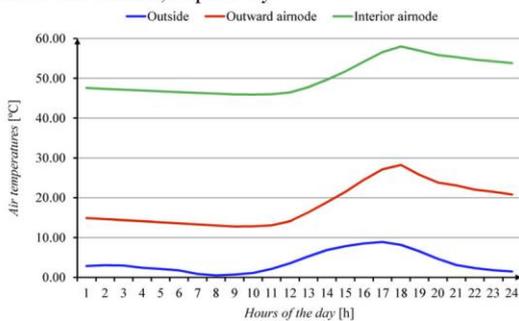
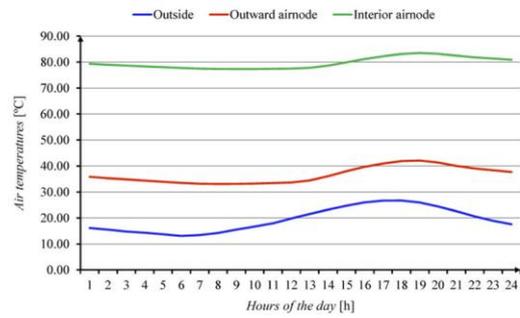
The characteristics of the assessed cases, both for the T-shaped space and for the rectangular shaped space, are detailed in Tables 7 to 8. T cases refers to the T-shaped space while R cases refers to the rectangular shaped space.

Indoor air temperature

The indoor air temperatures of the airnodes with two thermal zones, two airnodes and no air coupling are very different in cases T1 and R1. Figures 3 to 4 show the air temperatures for T1 during the intermediate days of winter and summer, respectively. Results for R1 are similar. The outward airnode air temperature is higher than the outside air temperature and has a similar graphic shape. However, the interior airnode air temperature graphic is a horizontal line, which does not follow the graphic shape of the outward airnode air temperature. This physical incoherence for two spaces in the same room implies that the virtual wall between thermal zones behaves like a real wall, blocking the energy transference between them.

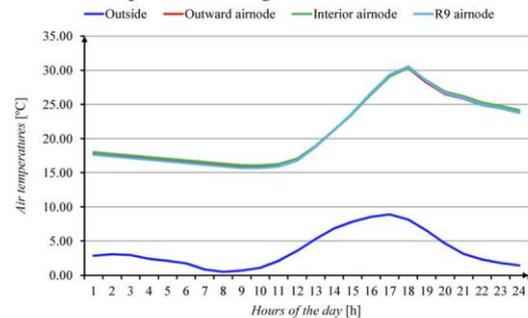
14th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics

Figure 3 Air temperatures for T1 case in winter

Figure 4 Air temperatures for T1 case in summer

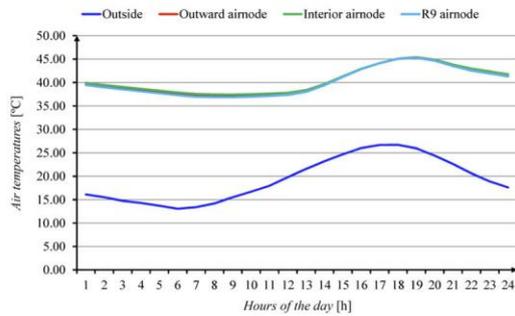
When the room is modelled as one thermal zone, with two airnodes linked by a virtual wall and no air coupling between them, the air temperatures are also different, as it is shown in Figures 5 to 6 for T2 case during the intermediate days of winter and summer, respectively.


Figure 5 Air temperatures for T2 case in winter

Figure 6 Air temperatures for T2 case in summer

It can be observed that the interior airnode suffers overheating (up to 80 °C in summer), because in this case the virtual wall is transparent to the solar radiation, but there is not air coupling with the outward airnode to transfer the excess of heat. In addition, the interior partitions and the ceiling are adiabatic, and only the floor is exterior, but it has thermal insulation.

But in successive cases T3 to T8 and R3 to R8, respectively, with air coupling rates increasing from 10 kg/h to 2,000 kg/h, the indoor air temperatures of each couple of airnodes converge progressively. The air temperature values for case T6 are shown in Figures 7 to 8 for the intermediate days of winter and summer, respectively. They are compared with case R9 which is supposed to be the most reliable because the space has been generated from a single thermal zone with a single airnode and without virtual wall. The air temperatures of the three airnodes are very similar, and their graphic shapes are according with the outside air temperature drawing.


Figure 7 Air temperatures for T6 and R9 cases in winter

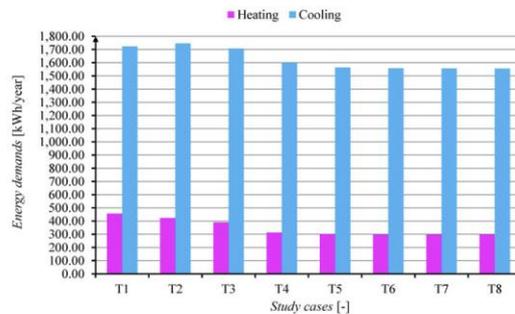
14th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics

Figure 8 Air temperatures for T6 and R9 cases in summer

Taking into account these results, cases T5 to T8 of the T-shaped space based in one thermal zone with two airnodes linked with a virtual wall and with air coupling rates from 500 kg/h to 2,000 kg/h are the most reliable.

Energy demands

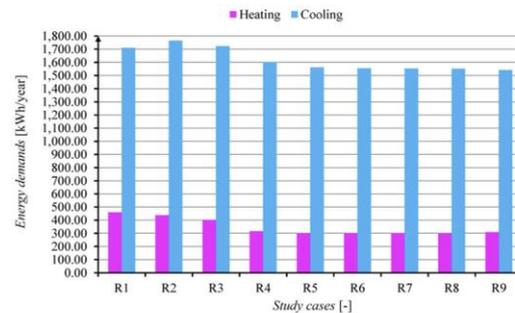
The obtained results of the yearly energy heating and cooling demands for the T-shaped space when HVAC systems are working are presented in Table 7 and Figure 9.

Case	Thermal zones	Airnodes	Air coupling, kg/h	Heating energy demand, kWh/year	Cooling energy demand, kWh/year
T1	2	2	0	456.31	1,722.77
T2	1	2	0	422.95	1,746.03
T3	1	2	10	390.36	1,707.21
T4	1	2	100	312.61	1,598.71
T5	1	2	500	298.90	1,563.26
T6	1	2	1,000	297.96	1,557.87
T7	1	2	1,500	297.72	1,556.01
T8	1	2	2,000	297.60	1,555.05

Table 7 T-shaped space energy demands

Figure 9 T-shaped space energy demands

The obtained results of the yearly energy heating and cooling demands for the rectangular shaped space when HVAC systems are working are presented in Table 8 and Figure 10.

Case	Thermal zones	Airnodes	Air coupling, kg/h	Heating energy demand, kWh/year	Cooling energy demand, kWh/year
R1	2	2	0	460.19	1,710.05
R2	1	2	0	437.60	1,764.46
R3	1	2	10	402.96	1,723.04
R4	1	2	100	316.32	1,602.07
R5	1	2	500	300.37	1,561.13
R6	1	2	1,000	299.29	1,554.92
R7	1	2	1,500	298.98	1,552.74
R8	1	2	2,000	298.84	1,551.63
R9	1	1	0	308.62	1,541.79

Table 8 Rectangular shaped space energy demands

Figure 10 Rectangular shaped space energy demands

In both spaces, the T-shaped and the rectangular one, the yearly cooling energy demand is bigger than the yearly heating energy demand. It is due to the Southwest orientation of the façade, which has a 61.80 % of glazing surface without solar protection.

The difference between the equivalent cases assessed for both spaces is small, so the rectangular shaped space is a good simplification of the T-shaped space. The percentage absolute values vary from 0.42 % to 3.46 % for heating energy demand, and from 0.14 % to 1.06 % for cooling energy demand, as it is shown, in Table 9.

Energy demand	T1-R1	T2-R2	T3-R3	T4-R4	T5-R5	T6-R6	T7-R7	T8-R8
Heating, %	-0.85	-3.46	-3.23	-1.19	-0.49	-0.45	-0.43	-0.42
Cooling, %	0.74	-1.06	-0.93	-0.21	0.14	0.19	0.21	0.22

Table 9 Difference between energy demands

The heating energy demand values descend from cases T1 to T8 and from R1 to R8. From T5 to T8 and from R5 to R8 the descending trend looks like a horizontal asymptote.

The cooling energy demand values descend from cases T2 to T8 and from R2 to R8. T1 and R1 are the second and the third larger values in their respective series. From T6 to T8 and from R6 to R8 the descending trend looks like a horizontal asymptote.

R9 case is supposed to be the most reliable because the space has been generated from a single thermal zone with a single airnode and without virtual wall. Thus, air coupling is

14th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics

not required. Comparing the R9 energy demand values with the T-shaped cases it is observed that the differences are small from T5 to T8, both for heating and for cooling energy demands. The percentage absolute values vary from 1.28 % to 32.37 % for heating energy demand, and from 0.85 % to 11.70 % for cooling energy demand, as it is shown in Table 10.

Energy demand	T1-R9	T2-R9	T3-R9	T4-R9	T5-R9	T6-R9	T7-R9	T8-R9
Heating, %	32.37	27.03	20.94	1.28	-3.25	-3.58	-3.66	-3.70
Cooling, %	10.50	11.70	9.69	3.56	1.37	1.03	0.91	0.85

Table 10 Difference between energy demands ($T_n - R9$)

Taking into account these results, cases T5 to T8 of the T-shaped space based in one thermal zone with two airmodes linked with a virtual wall and with air coupling rates from 500 kg/h to 2,000 kg/h are the most reliable.

CONCLUSIONS

TRNSYS package is a powerful energy simulation software but it has an important limitation when generating the 3D model of buildings by means of Trnsys3d plug-in: the shape of the generated spaces must be convex. It is necessary to divide concave spaces into rectangular thermal zones linked with a virtual wall.

A space can be formed by two or more thermal zones with a single airmode into each one, or by a single thermal zone with several airmodes inside.

A virtual wall between two thermal zones is opaque to the solar radiation, so an interior airmode adjacent to an outward airmode does not receive solar gains, resulting in a temperature without correlation with the adjacent thermal zone or outside. In contrast, a virtual wall between two airmodes is transparent to solar radiation, and an interior airmode adjacent to an outward airmode receives solar radiation. However, there is no additional energy transfer between inner and outward airmodes and a strong discrepancy between temperatures appears. In order to avoid this physical incoherence a coupling between adjacent airmodes has to be established. This work provides a methodology to calculate the couplings parameters based in the comparison with an equivalent rectangular volume.

An energy simulation study of a T-shaped and an equivalent rectangular shaped spaces have been developed by means of TRNSYS. Different cases have been assessed for the composition of both spaces: (i) two thermal zones with a single airmode into each one, (ii) one thermal zone with two airmodes inside and with different air coupling flow values, (iii) only for the rectangular shaped space, one thermal zone with a single airmode.

This study has been done first with set point temperatures to compare the energy demands of heating and cooling, and second, without setpoints to compare the interior air temperatures of the airmodes.

A comparison with a rectangular shaped space formed by a single thermal zone with a single airmode and without virtual wall leads us to conclude that the equivalent size T-shaped space based on one thermal zone with two airmodes linked with

a virtual wall and with air coupling rates from 500 kg/h to 2,000 kg/h is the best approximation to its real energy behaviour. This study shows that energy demand calculation relies strongly on thermal zone configuration. Differences up to 30 % for heating and 11 % for cooling can be obtained for different cases.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is part of the Doctoral Thesis of Raúl Briones Llorente, and it has been funded by the *Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León* (Spain) and co-funded by Operational Programme European Social Fund.

REFERENCES

- [1] TRNSYS <<http://www.trnsys.com/>> [accessed 7.3.2019].
- [2] Google SketchUp <<https://www.sketchup.com/>> [accessed 7.3.2019].
- [3] González Gil A., López-González J.L., Fernández M., Eguía P., Erkoreka A., Granada E., *Thermal energy demand and potential energy savings in a Spanish surgical suite through calibrated simulations*, *Energy & Buildings*, Vol. 174, 2018, pp. 513-526
- [4] Saleh Nasser Al-Saadi, Zhiqiang (John) Zhai, *A new validated TRNSYS module for simulating latent heat storage walls*, *Energy and Buildings*, Vol. 109, 2015, pp. 274-290
- [5] Beniot Delcroix, Michaël Kummert, Ahmed Daoud, *Development and numerical validation of a new model for walls with phase change materials implemented in TRNSYS*, *Journal of Building Performance Simulation*, Vol.10, N° 4, 2017, pp. 422-437
- [6] Paolo Valdiserri, Cesare Biserni, Giacomo Tosi, Massimo Garai, *Retrofit strategies applied to a tertiary building assisted by Trnsys energy simulation tool*, *Energy Procedia*, Vol. 78, 2015, pp. 765-770
- [7] W Stuart Dols, Steven J Emmerich, Brian J Polidoro, *Used coupled energy, airflow and indoor air quality software (TRNSYS/CONTAM) to evaluate building ventilation strategies*, *Building Services Engineering Research & Technology*, Vol. 37(2), 2016, pp. 163-175
- [8] *Ministerio de Fomento del Gobierno de España. Código Técnico de la Edificación. Documento Básico HE Ahorro de Energía* – Available at: <<https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-ahorro-energia.html>> [accessed 7.3.2019].
- [9] *Ministerio de la Presidencia del Gobierno de España. Real Decreto 2429/1979, de 6 de julio, por el que se aprueba la norma básica de edificación NBE-CT-79, sobre condiciones térmicas en los edificios* – Available at: <<https://www.boe.es/eli/es/rd/1979/07/06/2429>> [accessed 7.3.2019].
- [10] Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, *TRNSYS 17 – Multizone Building modeling with Type56 and TRNBuild*, Vol. 5, 2012, pp. 147-148

ANEXO 2

Artículo:

“Testing of the Integrated Energy Behavior of Sustainable Improved Mortar Panels with Recycled Additives by Means of Energy Simulation”



Article

Testing of the Integrated Energy Behavior of Sustainable Improved Mortar Panels with Recycled Additives by Means of Energy Simulation

Raúl Briones-Llorente ¹, Verónica Calderón ² , Sara Gutiérrez-González ², Eduardo Montero ¹ 
and Ángel Rodríguez ^{2,*}

¹ Department of Electromechanical Engineering, University of Burgos, Avenida de Cantabria s/n, 09006 Burgos, Spain; rbriones@ubu.es (R.B.-L.); emontero@ubu.es (E.M.)

² Department of Construction, University of Burgos, Calle Villadiego s/n, 09001 Burgos, Spain; vcalderon@ubu.es (V.C.); sggonzalez@ubu.es (S.G.-G.)

* Correspondence: arsaizmc@ubu.es; Tel.: +34-947-25-89-32

Received: 11 May 2019; Accepted: 30 May 2019; Published: 3 June 2019



Abstract: Present waste management policies aim to reduce waste environmental impacts and improve resources' efficiency. The use of waste and recycled materials to develop green construction materials are attracting researchers worldwide to develop new solutions addressed to increase the sustainability of buildings. This work presents a study of a new recycled mortar panel from the point of view of its contribution to the sustainability of buildings. Materials from industrial waste, as rigid polyurethane foam and electric arc furnace slags, are used as an additive of prefabricated mortar panels. The new proposed panels must have good thermal behavior with respect to the heat transfer interactions with the outside temperature and relative humidity, when compared to traditional brick or concrete. A test building with two kinds of representative uses, which are both residential and tertiary, and located in three cities of Spain with different climates, will be energy simulated in order to assess the thermal behavior of new construction or refurbished opaque ventilated façades with the new mortar panel. The thermal behavior of the new mortar panels would be studied by means of two energy assessments: (i) the evaluation of the influence of the new mortar panel in the energy demand of the whole building when compared to traditional materials, and (ii) the detailed analysis of the transient inner surface temperature of the space walls when using the new mortar panel. Based on the results obtained from the energy simulations performed, it follows that the thermal behavior of the mortar panel is, at least, equivalent to those of the other two materials, and even better in some aspects.

Keywords: construction; energy efficiency; recycled material; sustainability

1. Introduction

At present, waste management policies aim to reduce waste environmental impacts and improve resources' efficiency. The use of wastes and recycled materials to develop green construction materials are attracting researchers worldwide to develop new solutions addressed to increase the sustainability of buildings. Many waste materials coming from industry and demolition of buildings are now considered as potential substitutes of natural aggregates, even including e-waste [1]. Most research papers are devoted to the characterization of mechanical properties of such new additives when integrated in pieces of construction materials, using both experimentally or simulated tests. Only a few of them deal with evaluating properties as thermal transmittance [2,3], but always consider a small piece of material. When those new materials are integrated into a whole building, studies regarding the

evaluation of its influence are scarcely found. For instance, a study on the environmental behavior of the building by means of Life Cycle Analysis is reported in Reference [4]. Although some researchers have studied the use of waste on façades, references are scarce and almost none are reported on the energy assessment of those recyclable additives and materials when integrated in a building [5–8].

From the point of view of the construction process, the use of prefabricated components for building construction is currently receiving increased attention. Its advantage consists of its industrial production and easiness of assembly at the work site. Therefore, this means more efficiency in construction comparing with façades executed in situ. The purpose of this work is to develop new prefabricated panels for the covering layer of façades with an added value from the point of view of the sustainability, but maintaining the thermal behavior of traditional materials like brick or concrete, and a good behavior against external agents. The target is to test the thermal behavior of a new mortar panel made of recycled materials in order to boost the sustainability of the façade.

The new proposed mortar panels include the addition of rigid polyurethane foam waste. Recycled polyurethane has been proposed as an additive to construction materials due to some advantageous characteristics, such as its excellent adhesion to substrates of various natures and extreme speed of installation. The behavior of polyurethane foams, used as adhesives for the construction of thin joints brick masonry walls, has been investigated in Reference [9]. Concerning prefabricated panels, Reference [10] investigates the structural behavior of a prefabricated wall system made up of glass fiber-reinforced rigid polyurethane foam and magnesium oxide. Moreover, the addition of polyurethane waste leads to a decrease of the thermal conductivity and the specific weight of plasters and mortars, which contributes to the sustainability of buildings [11,12]. Previous studies of our group on the durability and mechanical properties of lightweight mortar made of cement-based mixtures with rigid polyurethane foam wastes show the influence of the amount of polyurethane on the density, mechanical properties, workability, permeability, and occluded air content, by comparison with traditional mortars [13–15], while Reference [16] reports the same for plaster and polyurethane mixtures. Additionally, slags coming from steelmaking furnaces have been also investigated by our group as mortar additives [17–23], which contributes to the revalorization of industrial waste materials.

The aim of this work is to study a new recycled mortar panel from the point of view of its contribution to the sustainability of buildings. Materials from industrial waste, as rigid polyurethane foam and electric arc furnace slags, are used as additives of prefabricated mortar panels. The new proposed panels must have not only a resistance purpose, but they should have good thermal behavior with respect to the heat transfer interactions with the outside temperature and relative humidity, when compared to traditional brick or concrete. Based on the results obtained from the energy simulations performed, it follows that the thermal behavior of the mortar panel is, at least, equivalent to those of the other two materials, and even better in some aspects. Meanwhile, sustainability is enhanced because of the reuse of waste material, which contributes to promoting “the circular economy.”

2. Materials and Methods

A test building with two kinds of representative uses, which are residential and tertiary, and located in three cities of Spain with different climates, will be energy simulated in order to assess the thermal behavior of the ventilated façades with the new mortar panel. The thermal behavior of the new mortar panels would be studied by means of two energy assessments: (i) the evaluation of the influence of the new mortar panel in the energy demand of the whole building when compared to traditional materials, and (ii) the detailed analysis of the transient inner surface temperature of the space walls when using the new mortar panel. Approaches combined, including total cumulated energy demand and transient surface temperatures, will give a true energy evaluation of the new material when integrated in a building. In this study, a representative two story-building with a rectangular shape has been energy simulated. Several operational conditions, building’s use and climatic data will be used for comparison. The simulations have been made by means of Transient System Simulation package (TRNSYS).

2.1. New Mortar Panel

A new mortar panel with the shape of an orthogonal parallelepiped, with 1.000 m × 0.400 m × 0.115 m dimensions, has been designed for this research, using cement mortar dosed with rigid polyurethane foam valued waste and electric arc furnace slags valued waste.

A prototype made in the laboratory of the Department of Construction of the University of Burgos is shown in Figure 1.

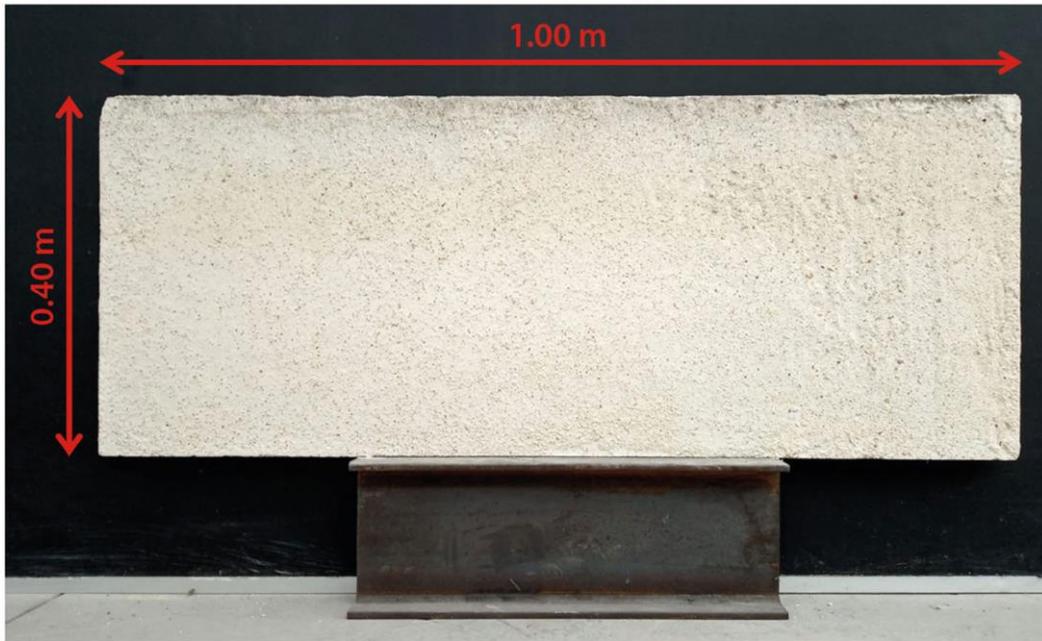


Figure 1. Prototype of the new mortar panel.

2.1.1. Materials and Dosing Mortar

For the research, a cement mortar manufactured with natural silicic aggregate and rigid polyurethane foams was designed. The composition of the mortar is as follows.

- **Cement:** Ordinary Portland cement Type CEM I 42.5 R, with a density of 3.150 kg/m³ and a Blaine Specific Surface Area of 4.100 cm²/g, determined by laser diffraction. The equipment is a Mastersizer X Malvern Panalytical, with a focal length lens of 300 mm, in order to capture the range of sizes of a dry sample of material in a single test, as per the specifications of Reference [24]. The majority of its particles (>85%) were less than 90 μ in size.
- **Natural Aggregates (NA):** Washed silica sand, 0/4 mm extracted from a sedimentary bed in an open-air quarry located at Montorio (Burgos, Spain), with actual density of 2.600 kg/m³ and fineness modulus (FM) of 3.5. It was analyzed by X-ray Fluorescence equipment, ARL ADVAT XP Sequential XRF Thermo Electron Corporation. The silica content was found to be greater than 97% in mass.
- **Rigid Polyurethane Foam Waste (PFW),** obtained from the destruction of panel waste used in the industry, using a RETSCH SM 100 laboratory blade mill with helical rotor and sieves. The apparent density of the PFW was measured on three cubic test specimens, which obtained an average apparent density of 26 ± 2 kg/m³. This is due to the mixture of open cells, closed cells, and pores. Figure 2 shows this cellular structure obtained by means of a **scanning electron microscope (SEM)** FEI Quanta 600. PFW was ground to obtain a uniform granularity with 75% of particles sized between 0.25 mm and 1.00 mm, before being blended with the other components of the mortar.

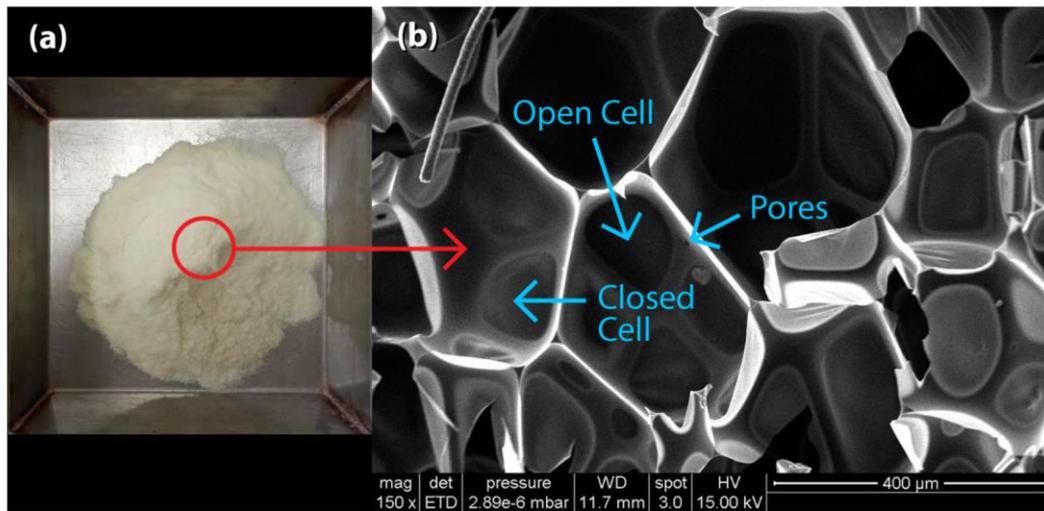


Figure 2. PFW (a) Ground polyurethane foam. (b) Cellular microstructure of rigid polyurethane, scale 400 μm .

The chemical composition of PFW obtained by the elemental analysis CHNS with an analyzer LECO CHNS-932 and with X-ray diffraction is shown in Table 1.

- Electric Arc Furnace Slag (EAFS) obtained in the steelmaking process (primary metallurgy). The slag is washed and sieved. The slag selects sizes smaller than 4 mm. Later, the slag stabilizes to avoid the volume variations produced by the expansion of the calcium oxide (CaO) and magnesium oxide (MgO). Once stabilized, the slag is analyzed by the X-ray Fluorescence Spectroscopic technique, with a Thermo Electron Corporation ARL ADVAT XP Sequential XRF with Claisse Fluxy. The results of the most significant components of the EAFS are shown in Table 2.
- Water: obtained from urban supply with good features for manufacturing conglomerates. The mortars have been manufactured and dosed with a mass water/cement ratio (w/c) = 1.16. The amount of added water was the amount needed to achieve mortars of plastic consistency. A slump on the flow table of 175 ± 10 mm is in accordance with Reference [25].

Table 1. Elemental analysis of polyurethane foam waste.

Element	C	O	N	H	Ca	Others	Total
Mass, %	62.2	5.6	7.2	12.1	0.0	13.1	100.0

Table 2. Chemical composition of Electric Arc Furnace Slag EAFS.

Values	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Others	Total
%	25.78	14.08	34.35	8.54	7.73	1.55	0.52	0.83	0.43	6.19	100.00

The raw materials used in the manufacture of mortar by weight kneading are shown in Table 3.

Table 3. Quantities of each of the raw materials for a mortar mix.

Weight	Cement	N. Aggregates	EAFS	PFW	Water
g	600	670	448	129	940

2.1.2. Mortar Characterization

Some mortar features required for the proposed research have been characterized by using the same techniques as in previous research articles [15,17,18].

- Dry bulk density of hardened mortar (δ): it has been determined according to the procedure established in Reference [25], by the relation between the material mass and the apparent volume that it takes up, by using the hydrostatic weighing scale methodology. It has been calculated by determining the average mass and the dimensions of the test specimen. Previously, the specimens were conditioned in an oven to a constant mass at 40 °C. Then, each specimen was weighed to a precision of ± 0.1 g, and its length and width recorded, measuring at three points along the length of the board and at three points along the width of the board. The thickness of the board should be measured at six points located close to one of the transversal edges.
- Thermal conductivity of hardened mortar (λ): it has been determined according to Reference [26], by means of a guarded hot plate and heat flow meter method, which establish a constant and uniform relationship between the heat flow density in the inside of the homogeneous samples and a set of plane parallel faces. Two mortar square samples with 0.150 m edge length and 0.015 m thickness have been developed and placed at both sides of the hot plate, which is perfectly fitted and insulated. The specimens were analyzed by means of a Laser Comp FOX 304 heat flow meter. In order to verify the results obtained by means of the guarded hot plate and heat flow meter method described, a new thermal conductivity test is performed with the C-THERM TCI equipment that uses the patented Modified Transient Plane Source (MTPS) technique. The average value obtained by both test procedures is shown in Table 4.
- Water vapor diffusion resistance factor (μ): Water Vapor Permeance (W_p) and Water Vapor Permeability (δ_p) should be known previously, according to Reference [27]. This Standard specifies that, to find the permeability value, it is first necessary to calculate the permeance, which is the water vapor flow that passes through one area unit under equilibrium conditions for each unit of the vapor pressure difference on both sides of the mortar. Subsequently, water vapor permeability is calculated as the result of multiplying the permeability by the thickness of the test specimen. Five test specimens have been prepared and tested, in order to establish the permeability in all of them, and then we used the average value for each of the different grades mortar. The water vapor diffusion resistance factor is calculated by the relation between the air vapor permeability and the one obtained for the mortar.
- Specific heat (C_p): The specific heat of the mortar with foams was determined, according to the analytical procedure method of mixtures described in Reference [28].

Table 4. New mortar panel.

Material	t , m	λ , W/m \times K	C_p , J/kg \times K	δ , kg/m ³	μ , dimensionless
Mortar panel	0.115	0.980	969.000	1,150.000	11.450

The main features of the new mortar panel are shown in Table 4.

2.2. Building Energy Simulation

Once the new mortar with recycled additives has been characterized, its energy behavior when integrated into a case study building should be assessed. The aim is to check if the new mortar panel behaves at least as well as the traditional materials, from the point of view of the energy analysis. The study will be performed by means of the energy simulation results of two sets of properties. The first one is evaluating the influence of the new mortar panel in the energy demand of the whole building when compared to traditional materials. Yearly heating demands and cooling demands are assessed for three different locations and climates. The second set of results is a detailed analysis of the

transient inner surface temperature of the space walls when using the new mortar panel. When both approaches are combined, total cumulated energy demand, and transient surface temperatures will give a truly energy evaluation of the new material when integrated in a building.

In this study, a representative two-story building with a rectangular shape has been energy simulated. Several operational conditions, building's use, and climatic data will be used for comparison. The simulations have been made by means of the Transient System Simulation package (TRNSYS v.17, Thermal Energy System Specialists, LLC, Madison, WI, USA) [29], which is an extremely flexible, graphically-based software environment used to simulate the behavior of transient systems, such as buildings. TRNSYS is made up of two parts. The first one reads and processes the input file, iteratively solves the system, determines convergence, and plots system variables. The second part is an extensive library of components, which models the performance of one part of the system.

2.2.1. Building Geometry

The building has two equal storeys with a rectangular shape, with floor dimensions 25.00 m × 12.00 m, and a height of 3.00 m (inside measurement). There is also a third story with a non-habitable space under the sloping roof. The first and second stories have an equal distribution. They have 10 habitable spaces divided in two groups of five spaces along the longest façades. Between these two groups, there is a corridor.

The living spaces are squares with a 5-m edge length. The six intermediate ones have a square window with a 1-m edge length. The four corner spaces have two façades, with one square window at each one. The corridors have a rectangular shape with dimensions of 25 m × 2 m. They have two façades, with a door on each one, with dimensions of 1 m × 2 m.

The shape and dimensions of the building are shown in Figures 3 and 4.

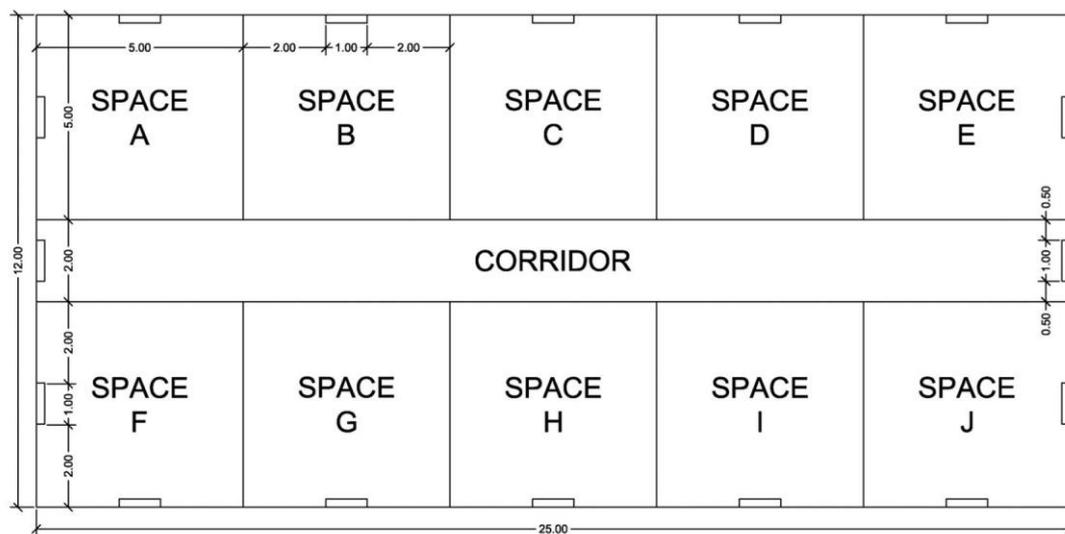
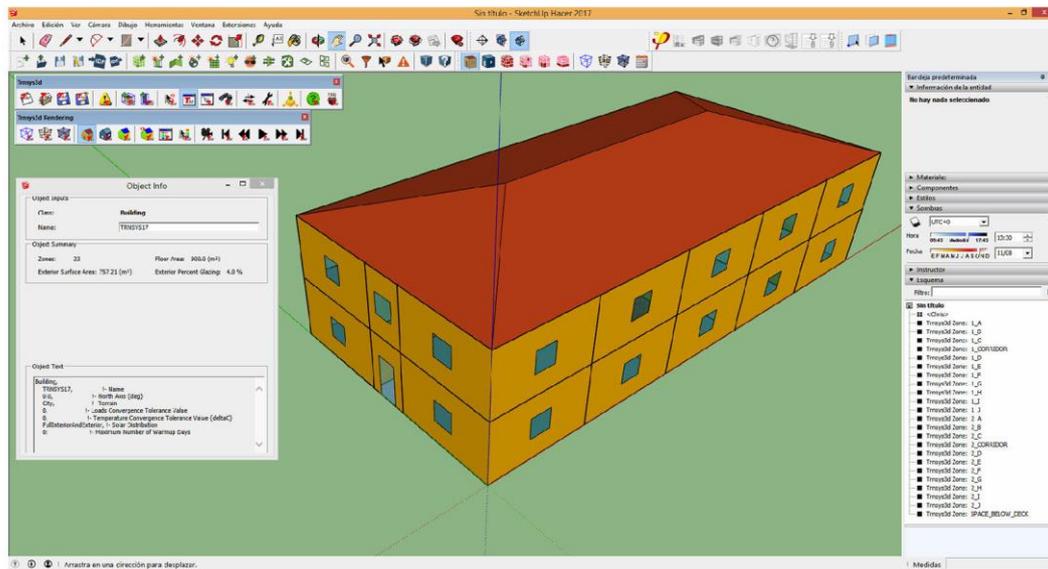


Figure 3. Basement and first stories.


Figure 4. 3D building simulation.

2.2.2. Building Constructive Features

Building enclosures and inner partitions have been generated by layers with TRNSYS, ordered from inside to outside, according with the constructive features of the materials of each layer. The thermal transmittance of all of them and the windows are always under the limits allowed by the Spanish Building Code [30], which are different depending on the climate of the three Spanish cities chosen for the energy simulations: Burgos, Barcelona, and Almería. That means three different values of thermal insulation, with each corresponding to the respective location.

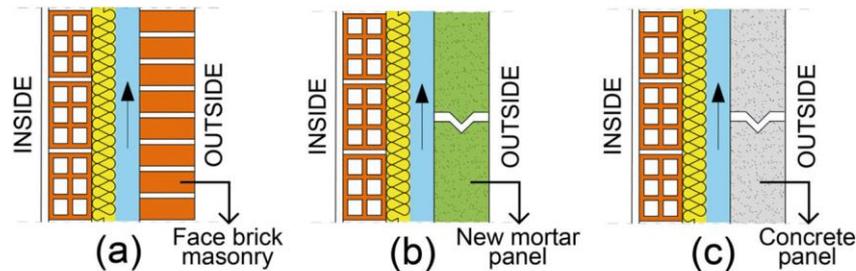
Three types of façades have been assessed with different outer covering layers: (i) face brick masonry, (ii) new mortar panel, and (iii) concrete panel. All of the façades simulated have the minimum insulation thickness in order to not exceed the limits of the Spanish Building Code [30]. Now, all of the constructive features of the façades are shown in Tables 5 and 6 (in layers from the inside to the outside). In addition, constructive sections of the façades are shown in Figure 5.

Table 5. Geometrical and thermophysical properties of the façades.

Material	t , m	λ , W/(m K)	C_p , J/(kg K)	δ , kg/m ³	$R_{n,r}$, (m ² K)/W
Gypsum plaster	0.015	0.400	1000.000	900.000	—
Hollow brick masonry	0.090	0.432	1000.000	930.000	—
Thickness of insulation in decreasing order, for the cities of Burgos, Barcelona, and Almería					
MW isolation (Burgos)	0.040	0.031	1000.000	40.000	—
MW isolation (Barcelona)	0.030	0.031	1000.000	40.000	—
MW isolation (Almería)	0.010	0.031	1000.000	40.000	—
Closed joints ventilated air chamber	0.050	—	—	—	0.090
Three different outer covering layers					
Face brick masonry	0.115	0.667	1000.000	1140.000	—
New mortar panel	0.115	0.980	969.000	1150.000	—
Concrete panel	0.115	2.300	2400.000	1000.000	—

Table 6. Thermal transmittance of the façades U [W/(m² K)].

City	Outer Covering Layer		
	Face Brick Masonry	New Mortar Panel	Concrete Panel
Burgos	0.509	0.524	0.543
Barcelona	0.609	0.630	0.658
Almería	1.000	1.059	1.140


Figure 5. Constructive sections of the façades. (a) Face brick masonry. (b) New mortar panel. (c) Concrete panel.

Linear thermal bridges have not been considered to force the thermal gains and losses through the façades for obtaining clearer results. A medium solar absorptance value ($\alpha = 0.5$) has been estimated for all of the building enclosures.

2.2.3. Building Operational Conditions

Two user profiles based both on the “residential” and on the “not residential conditions with medium intensity during the 12-h use profile,” from Reference [30], have been generated for TRNSYS. The occupation ratio for residential use is 1 person/20 m², and, for tertiary use, is 1 person/10 m², respectively. The considered equipment for the residential use is the usual electrical households, and, for the tertiary use, is the usual office equipment, like computers, printers, or photocopiers.

For the second user profile, lighting internal gains have been calculated based on the use of compact fluorescent lamps with an energy performance of 80 lm/W. The average horizontal illuminance is 500 lux. The considered space ventilation ratios are 0.63 renovations/hour for residential use and 0.80 for tertiary use. The values are detailed in Tables 7–12. The HVAC systems description is not the purpose of this research work.

Table 7. Set point temperatures and mechanical ventilation in residential use.

Days of the Year	Schedule—Set Point Heating Temperature (low)	T, °C
Every day in January to May	0h00–7h00	17.00
	8h00–23h00	20.00
Every day in June to September	0h00–23h00	—
Every day in October to December	0h00–7h00	17.00
	8h00–23h00	20.00
Days of the Year	Schedule—Set Point Cooling Temperature (High)	T, °C
Every day in January to May	0h00–23h00	—
	0h00–7h00	27.00
Every day in June to September	8h00–15h00	—
	16h00–23h00	25.00
Every day in October to December	0h00–23h00	—
Days of the Year	Schedule—Mechanical Ventilation	ren/h
Every day in Summer	1h00–8h00	4.00
	9h00–0h00	0.63
Every day in Winter	0h00–23h00	0.63

Table 8. Internal gains in residential use.

Due to	Days of the Week	Schedule	W/m ²
Sensible occupation	Working days	0h00–7h00	2.15
		8h00–15h00	0.54
		16h00–23h00	1.08
	Sundays and Holidays	0h00–23h00	2.15
	Latent occupation	Working days	0h00–7h00
8h00–15h00			0.34
16h00–23h00			0.68
Sundays and Holidays		0h00–23h00	1.36
Lighting		Everyday	0h00
	1h00–7h00		0.44
	8h00–18h00		1.32
	19h00		2.20
	20h00–23h00		4.40
Equipment	Everyday	0h00	2.20
		1h00–7h00	0.44
		8h00–18h00	1.32
		19h00	2.20
		20h00–23h00	4.40

Table 9. Total internal gains in residential use.

Hours	0h00	1h00–7h00	8h00–15h00	16h00–19h00	20h00–23h00
W/m ²	7.91	4.39	3.52	4.84	10.56

Table 10. Set point temperatures and mechanical ventilation in tertiary use.

Days of the Year	Schedule—Set Point Heating Temperature (low)	T _i , °C
Working days and Saturdays	0h00–6h00, 15h00–16h00 and 21h00–23h00	—
Sundays and Holidays	7h00–14h00 and 17h00–20h00	20.00
	0h00–23h00	—
Days of the Week	Schedule—Set Point Cooling Temperature (High)	T _i , °C
Working days and Saturdays	0h00–6h00, 15h00–16h00 and 21h00–23h00	—
Sundays and Holidays	7h00–14h00 and 17h00–20h00	25.00
	0h00–23h00	—
Days of the Week	Schedule—Mechanical Ventilation	ren/h
Working days	0h00–6h00, 15h00–16h00 and 21h00–23h00	—
	7h00–14h00 and 17h00–20h00	0.80
Saturdays	0h00–6h00 and 15h00–23h00	—
Sundays and holidays	7h00–14h00	0.80
	0h00–23h00	—

Table 11. Internal gains in tertiary use.

Due to	Days of the Week	Schedule	W/m ²
Sensible occupation	Working days	0h00–6h00, 15h00–16h00 and 21h00–23h00	—
		7h00–14h00 and 17h00–20h00	6.00
	Saturdays	0h00–6h00 and 15h00–23h00	—
		7h00–14h00	6.00
Sundays and holidays	0h00–23h00	—	
Latent occupation	Working days	0h00–6h00, 15h00–16h00 and 21h00–23h00	—
		7h00–14h00 and 17h00–20h00	3.79
	Saturdays	0h00–6h00 and 15h00–24h00	—
		7h00–14h00	3.79
Sundays and holidays	0h00–23h00	—	
Lighting	Working days	0h00–6h00, 15h00–16h00 and 21h00–23h00	—
		7h00–14h00 and 17h00–20h00	6.25
	Saturdays	0h00–6h00 and 15h00–23h00	—
		7h00–14h00	6.25
Sundays and holidays	0h00–23h00	—	
Equipment	Working days	0h00–6h00, 15h00–16h00 and 21h00–23h00	—
		7h00–14h00 and 17h00–20h00	4.50
	Saturdays	0h00–6h00 and 15h00–23h00	—
		7h00–14h00	4.50
Sundays and holidays	0h00–23h00	—	

Table 12. Total internal gains in residential use.

Hours	0h00–6h00	7h00–14h00	15h00–16h00	17h00–20h00	21h00–23h00
W/m ²	0.00	20.54	0.00	20.54	0.00

2.2.4. Climatic Conditions

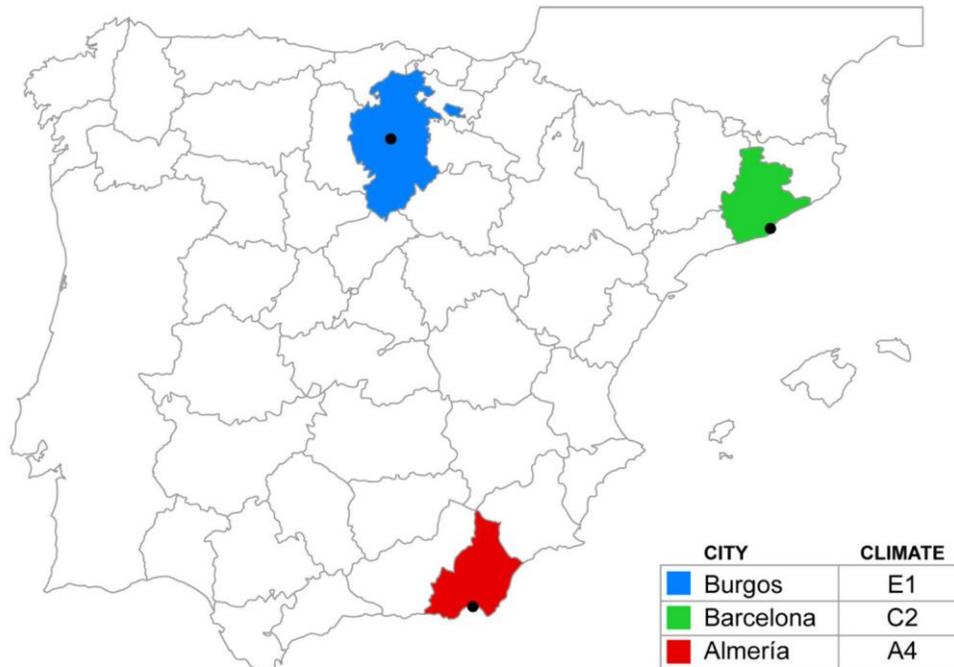
Energy simulations have been performed locating the office in three Spanish cities: Burgos, Almería, and Barcelona, which are representative of the most severe climate in Winter (E1), the most severe climate in Summer (A4), and an average climate (C2), respectively, according to Reference [30]. They are shown in Figure 6 and Tables 13 and 14.

Table 13. Selected locations for the respective climatic zone.

City	Climatic Zone	Longitude	Latitude	Height Above the Sea Level, m
Burgos	E1	42°21' N	3°42' O	856
Barcelona	C2	41°23' N	2°11' E	13
Almería	A4	36°50' N	2°27' O	27

Table 14. Monthly average air temperature of the selected locations.

City	Climate	Monthly Average Air Temperature, °C											
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Burgos	E1	3.1	4.1	7.0	8.6	12.2	16.5	19.5	19.5	16.1	11.5	6.6	3.9
Barcelona	C2	9.2	9.9	11.8	13.7	16.9	20.9	23.9	24.4	21.7	17.8	13.0	10.0
Almería	A4	12.6	13.3	15.1	17.0	19.7	23.5	26.1	26.7	24.2	20.4	16.4	13.8


Figure 6. Climate conditions.

3. Results and Discussion

3.1. Energy Demand

Eighteen energy simulations of the building have been developed by means of the TRNSYS package, with the purpose of assessing the heating and cooling demands. The simulations have been performed considering all the possible combinations of:

- City location: Burgos, Barcelona, or Almería.
- Use: residential or tertiary.
- Outer covering layers: face brick masonry, new mortar panel, or concrete panel.

The results of the energy demands for the three cities with each of the three possible outer covering layers are shown in Figures 7–10, for comparing the results. Figures 7 and 8 correspond to the residential use, while Figures 9 and 10 correspond to tertiary use. On the top of each bar of the diagrams, the exact value of each energy demand is shown, in kWh/(m² year), in order to make both the understanding and the comparison easier.

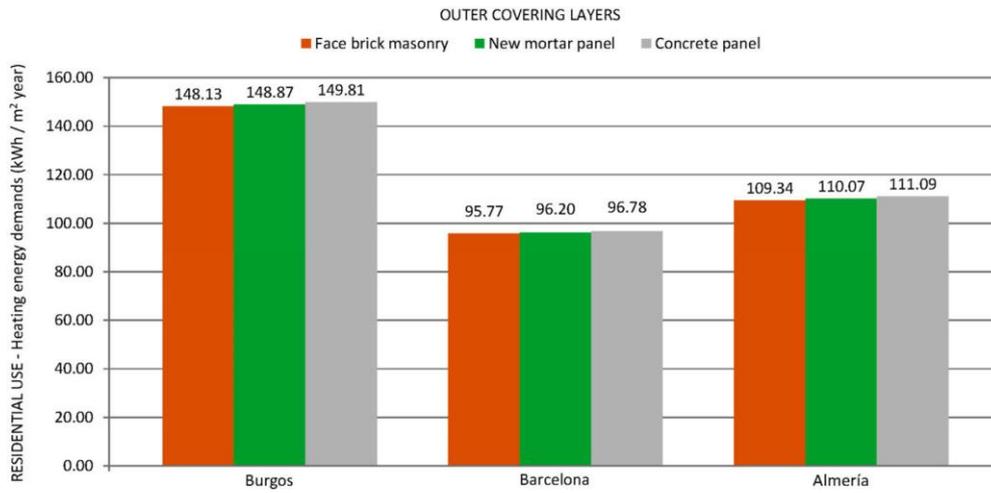


Figure 7. Residential use. Heating energy demands.

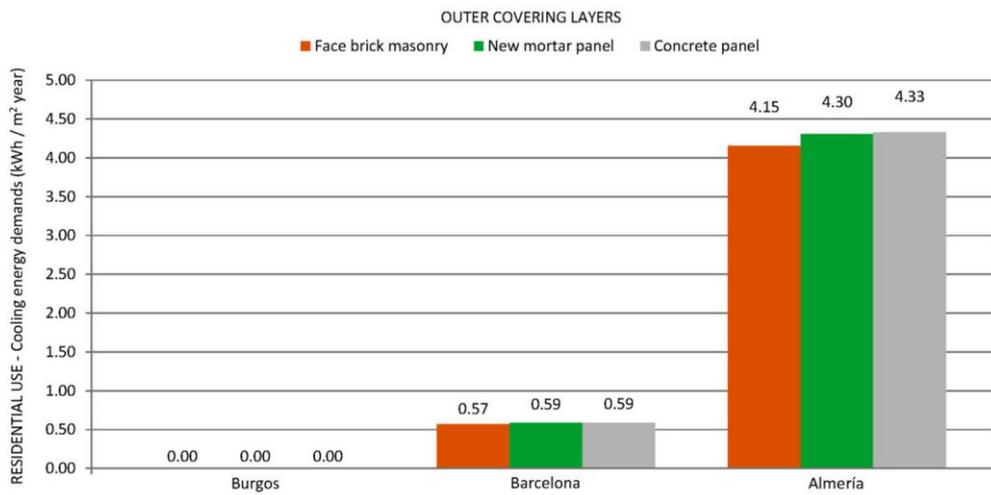


Figure 8. Residential use. Cooling energy demands.

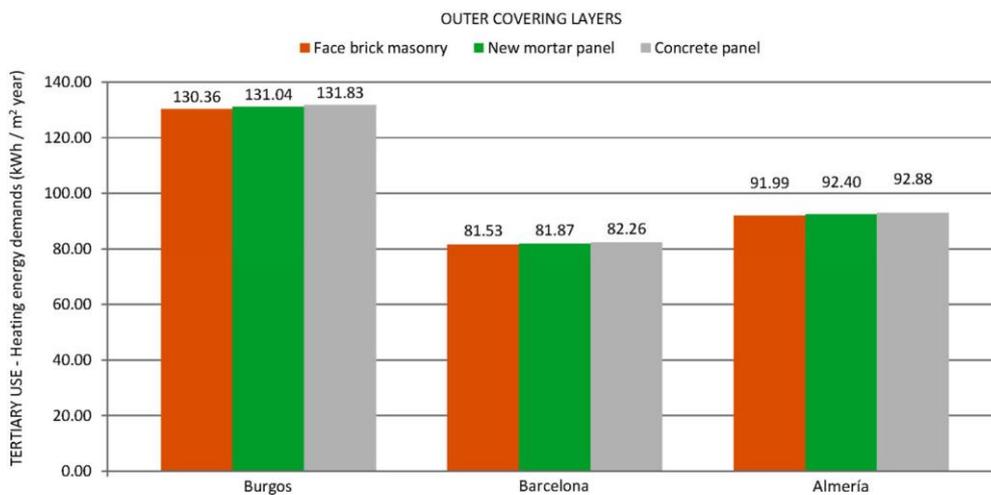


Figure 9. Tertiary use. Heating energy demands.

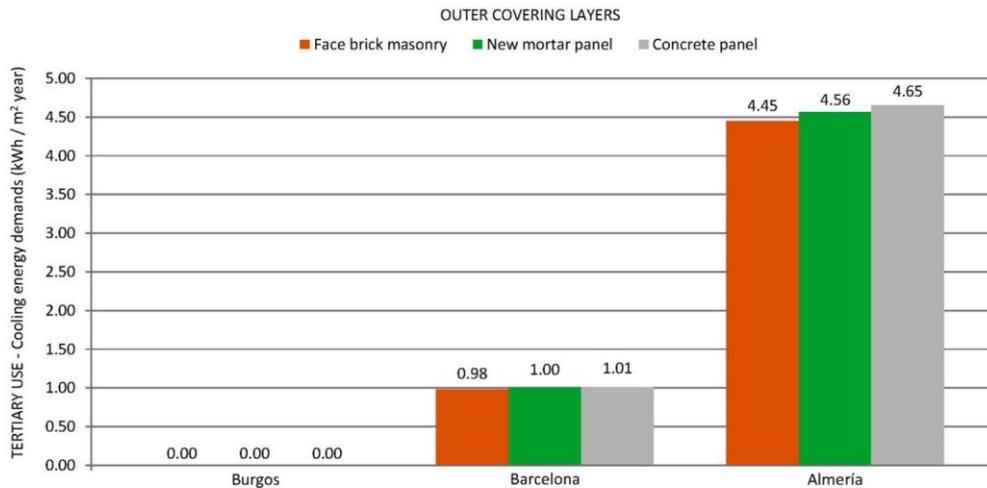


Figure 10. Tertiary use. Cooling energy demands.

It can be observed in these figures that the maximum heating energy demand and the minimum cooling energy demand are obtained by using the concrete panel as the outer covering layer, for both residential and tertiary use, and in all of the three cities where the building is located for this study. In contrast, the minimum heating energy demand and the maximum cooling energy demand is obtained using the face brick masonry as the outer covering layer. Using the new mortar panel, intermediate energy demands are obtained for heating and for cooling.

It means that the new proposed mortar panel shows thermal behavior in accordance with its thermal transmittance, as reported in Table 6, and can be considered an alternative to traditional materials to accomplish with the present building technical codes.

As expected, the influence of the user profile shows that the heating energy demands are always higher in residential use, and, in contrast, the cooling energy demands are always higher in tertiary use, due to the presence of internal gains. In a similar manner, the maximum heating demand corresponds to the location with the most severe winter conditions (Burgos, E1) while, in the opposite, the maximum cooling demand corresponds to the most severe summer conditions (Almería A4).

3.2. Temperature Profile of Inner Walls

A second step of this simulation study is to evaluate the transient inner surface temperature of the different external walls. Inner wall temperature is of the utmost importance when evaluating the radiation exchanges between walls and persons due to temperature differences. Thus, it will be possible to assess the influence of using each of the three outer covering layers proposed in this temperature, which is important for the comfort of the users of the building, and also for reducing the risk of surface condensations.

A set of 24 energy simulations have been developed by means of TRNSYS package, considering all the possible combinations of:

- City location: Burgos or Almería, because they have the extreme values of low and high temperatures, respectively.
- Building use: residential or tertiary.
- Outer covering layers: face brick masonry, new mortar panel, or concrete panel.
- Orientation of the two main façades: North and South, or East and West. For obtaining these last orientations, the building has been rotated 90° with TRNSYS.

The external walls of the two central spaces C and H of the second floor have been assessed for all the orientations: space C, pointed both to North and West, and space H, pointed both to South and East.

Yearly simulations have been carried out, obtaining 8760 hourly values for the inner surface temperature of the respective external wall in each case. Concerning the influence of the outer covering layers, there is no significant influence in the inner wall temperature, with independence of the building use, climate, or orientation. The maximum temperature difference among cases is 0.5 °C, which has a negligible influence on radiant or convective heat exchange inside the space.

Sixty-four cases have been simulated. In each case, the transient evolution of the inner surface temperature, concerning the three outer covering layers, has been assessed. In addition, they include both the influences of the two different climates and the two user profiles previously explained in Tables 7–12.

Four representative working days have been selected to show below.

- 02/February: the middle day of winter.
- 04/May: the middle day of spring.
- 06/August: the middle day of summer.
- 06/November: the middle day of autumn.

Table 15 presents the minimum and maximum inner surface temperatures for residential and tertiary uses in Almería and Burgos, as obtained from the simulation. As expected, the influence of the respective climate location leads to higher wall minimum and maximum temperatures for Almería than for Burgos, for any building use and façade orientation, and in correspondence with the monthly average temperatures given in Table 14.

Table 15. Simulation of temperatures with respect to the use of three outer covering layers. Results of minimum and maximum inner surface temperatures for residential and tertiary uses in Almería and Burgos.

City	Use	Façade	Season	Hour	Minimum, °C	Maximum, °C
Almería	Residential	North	Winter	7	Concrete panel: 17.75 Face brick masonry: 17.85 New mortar panel: 17.77	—
		West	Summer	1	—	Concrete panel: 25.61 Face brick masonry: 25.52 New mortar panel: 25.57
	Tertiary	North	Autumn	7	Concrete panel: 17.47 Face brick masonry: 17.57 New mortar panel: 17.48	—
		West	Summer	1	—	Concrete panel: 26.06 Face brick masonry: 25.96 New mortar panel: 26.04
Burgos	Residential	North	Summer	8	Concrete panel: 16.71 Face brick masonry: 16.69 New mortar panel: 16.67	—
		West	Spring	19	—	Concrete panel: 20.36 Face brick masonry: 20.38 New mortar panel: 20.43
	Tertiary	North	Winter	7	Concrete panel: 16.94 Face brick masonry: 17.01 New mortar panel: 16.96	—
		West	Summer	20	—	Concrete panel: 21.90 Face brick masonry: 21.91 New mortar panel: 21.98

For both locations, and both residential and tertiary use, the minimum temperatures always correspond to the North façade and the maximum to the West one. Some daily profile temperatures are presented in Figures 11–15.

Figure 11 shows the temperature profile for the selected middle day of winter, for residential use in Almería. The minimum inner surface temperature appears at 7 h, which is just before the dawn, reflecting the decrease of ambient temperature during the night. Between 7.00 h and 8 h, there occurs a slight increase in temperature due to the incoming daylight radiation. The heating schedule starts at 8 h and then the temperature of the inner wall increases, which reaches 19.50 °C by 23 h due to the heating and internal gain schedule, following the set point of 20 °C for ambient temperature. When changing to tertiary use (Figure 12), the minimum wall temperature also appears at 7 h in the middle of the day in autumn. The difference in the temperature profile with respect to the residential use (slope, pikes) is only due to the respective heating schedule. Since ambient temperature at 7 h would be lower than the set-point of 20.0 °C, the heating starts at 14 h, and then a local peak is reached at 15 h. The temperature decreases along two hours, since the heating schedule began again at 17 h until 20 h. The maximum temperature of 19.50 °C of the inner wall is reached at 21 h due to the thermal inertia of internal gains. As shown in the figures, no significant differences can be appreciated in the temperature profiles due to the change of the outer layers (face brick masonry, new mortar panel, or concrete panel).

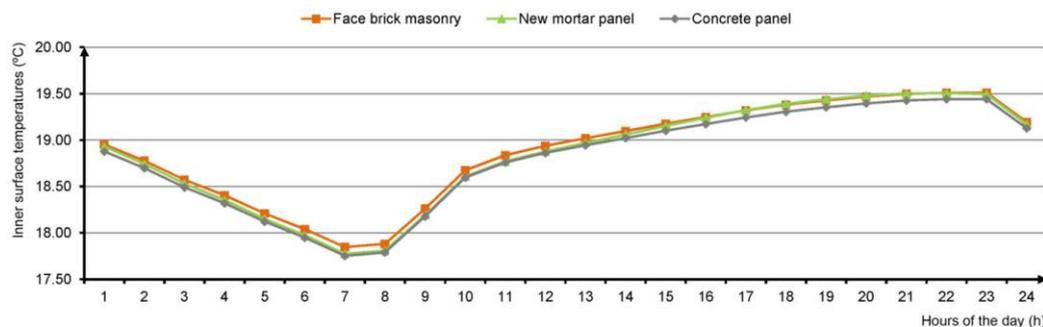


Figure 11. Almería. Residential use. North façade. Winter.

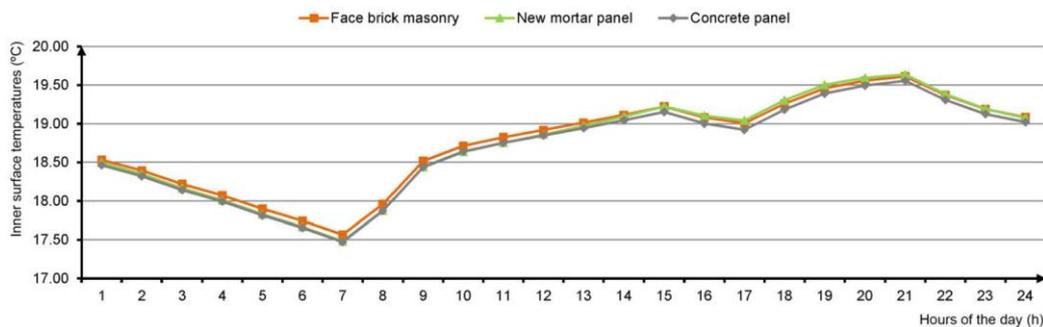


Figure 12. Almería. Tertiary use. North façade. Autumn.

When performing analysis for the minimum wall temperatures for the location in Burgos, the temperature profiles are very similar to the case of Almería, but the difference is that the minimum value appears in the summer for residential use (instead of the winter) and, in winter, for tertiary use (instead of autumn). Though it could be striking to find a minimum temperature in the summer, the results are coherent as, for residential use, no heating is active in the summer (Table 7) and the average temperatures of August in Burgos are not as high as in Almería (Table 14).

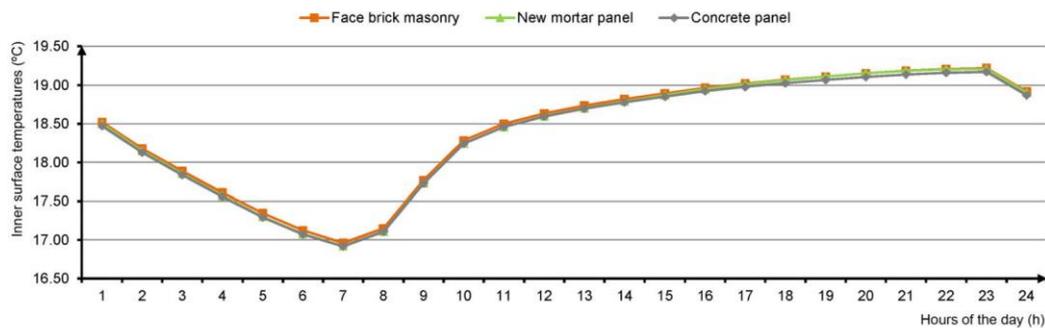


Figure 13. Burgos. Residential use. North façade. Winter.

For the purpose of comparison with Almería (Figure 11), Figure 13 represents the temperature profile for the same winter day in Burgos, in residential use. The shape of the inner wall temperature for residential use exhibits the same pattern as the one of Almería, which reaches almost the same temperatures due to the activation of heating in both locations and the use of the same set point. Meanwhile, when looking at the summer conditions (Figure 14), the minimum temperature reached at 7 h is slightly lower than the one in winter, and the same occurs with the maximum temperature of the day (18.20 °C) due to the absence of heating.

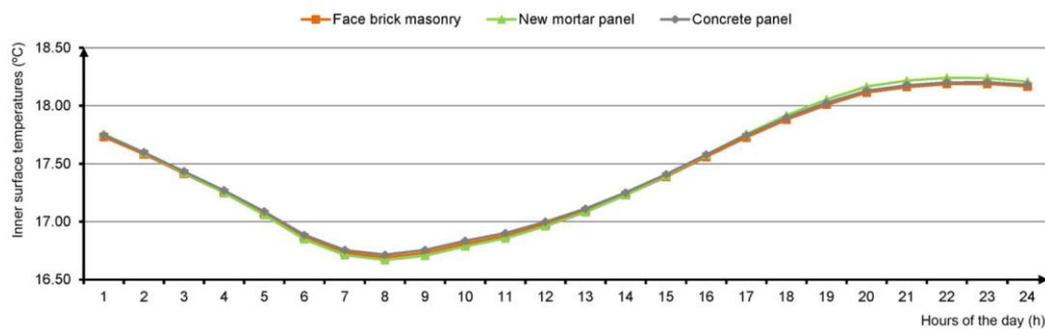


Figure 14. Burgos. Residential use. North façade. Summer.

When considering the tertiary use in Burgos, Figure 15 shows the corresponding temperature profile, in accordance with the schedule in Table 10, which presents the local peak at 15 h. In any case, due to climate differences, the temperature reached are always lower than those of Almería.

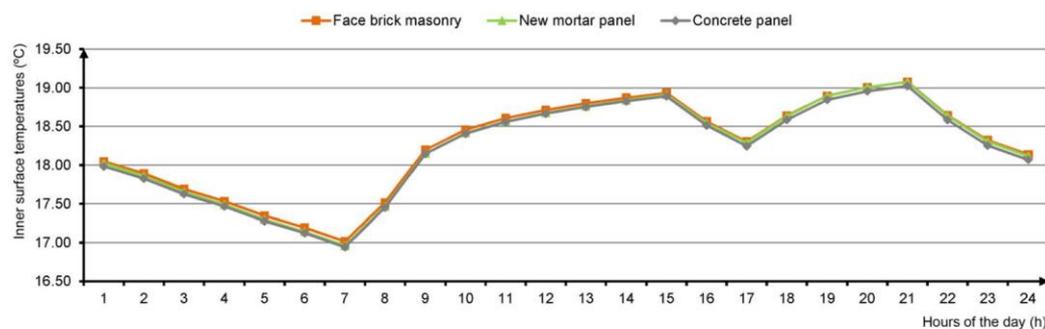


Figure 15. Burgos. Tertiary use. North façade. Winter.



Further simulations varying the building use, the façade orientation, and the average day have been performed, with up to 64 cases. The differences in inner wall temperatures and daily temperature profiles present results similar to those analyzed in this scenario.

From the information summarized in Table 15 and Figures 9–13, we can conclude that the new mortar panel made with recycled additives behaves at least as well as the traditional materials (concrete, brick masonry). Both approaches used, macro-analysis and micro-analysis on a yearly or daily basis, show no significant differences among the previously mentioned materials when evaluating the total energy demand of the building and some transient surface temperatures. From the point of view of sustainability, the new mortar panel provides great benefits in comparison to the two other traditional materials, because it contains rigid polyurethane foam and electric arc furnace slag obtained from industrial valued waste. The energy that would be used both for processing this waste and for making an equivalent volume of concrete or brick masonry is saved.

4. Conclusions

A new mortar has been designed for manufacturing panels for building façades, using rigid polyurethane foam and electric arc furnace slag obtained from industrial valued waste. Thus, both the waste and the raw material produced, and the energy used in both processes are reduced.

A systematic procedure has been developed based on the energy simulation of a sample building, in order to assess the influence of the use of the new mortar panel in comparison with the other two traditional materials, which take into account the user profile, the climatic conditions, and the outer covering layers. The objective was to test if the new mortar panel behaves at least as well as the traditional materials, from the point of view of the energy analysis. First, the evaluation of the influence of the new mortar panel in the energy demand of the whole building when compared to traditional materials has been performed. Second, a detailed analysis of the transient inner surface temperature of the space walls when using the new mortar panel has been carried out. When both approaches are combined, the total cumulated energy demand and transient surface temperatures, give us a true energy evaluation of the new material, when integrated in a building. Based on the results obtained both from the new mortar panel features and from the energy simulations performed, it follows that the thermal behavior of the mortar panel is, at least, equivalent to those of the other two materials, and even better in some aspects.

Author Contributions: R.B.-L., E.M., and A.R. Methodology, R.B.-L., E.M., and A.R. Software, R.B.-L. Formal analysis, V.C. and S.G.-G. Investigation, R.B.-L., V.C., and S.G.-G. Data curation, R.B.-L. and A.R. Writing—original draft preparation, review, and editing, R.B.-L. and E.M. Supervision, A.R.

Funding: This research received no external funding.

Acknowledgments: This work is part of the Doctoral Thesis of Raúl Briones-Llorente, and it has been funded by the *Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León* (Spain) and co-funded by the Operational Programme European Social Fund.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Krausmann, F.; Gingrich, S.; Eisenmenger, N.; Erb, K.-H.; Haberl, H.; Fischer-Kowalski, M. Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecol. Econ.* **2009**, *68*, 2696–2705. [[CrossRef](#)]
2. Zheng, J.L.; Zhang, H.Z. Thermal performance study of self-thermal insulation & recycled concrete hollow block. *Eng. Mech.* **2015**, *32*, 51–56.
3. Li, J.; Chen, W. Heat Transfer Dynamic Analyses for Recycled-Concrete Wall Combined with Expanded Polystyrene Template. *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2018**, 9692806. [[CrossRef](#)]
4. Cuenca-Moyano, G.M.; Martín-Morales, M.; Bonoli, A.; Valverde-Palacios, I. Environmental assessment of masonry mortars made with natural and recycled aggregates. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2019**, *24*, 191–210. [[CrossRef](#)]



5. Cetiner, I.; Shea, A.D. Wood waste as an alternative thermal insulation for buildings. *Energy Build.* **2018**, *168*, 374–384. [[CrossRef](#)]
6. Zhu, M.; Ji, R.; Li, Z.; Wang, H.; Liu, L.; Zhang, Z. Preparation of glass ceramic foams for thermal insulation applications from coal fly ash and waste glass. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *112*, 398–405. [[CrossRef](#)]
7. Moussa, T.; Maalouf, C.; Ingraio, C.; Scrucca, F.; Costantine, G.; Asdrubali, F. Bio-based and recycled-waste materials in buildings: A study of energy performance of hemp-lime concrete and recycled-polyethylene terephthalate façades for office facilities in France and Italy. *Sci. Technol. Built Environ.* **2018**, *24*, 492–501. [[CrossRef](#)]
8. Patnaik, A.; Mvubu, M.; Muniyasamy, S.; Botha, A.; Anandjiwala, R.D. Thermal and sound insulation materials from waste wool and recycled polyester fibers and their biodegradation studies. *Energy Build.* **2015**, *92*, 161–169. [[CrossRef](#)]
9. Foti, D.; Lerna, M.; Vacca, V. Experimental characterization of traditional mortars and polyurethane foams in masonry wall. *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2018**, 8640351. [[CrossRef](#)]
10. Manalo, A. Structural behaviour of a prefabricated composite wall system made from rigid polyurethane foam and Magnesium Oxide board. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *41*, 642–653. [[CrossRef](#)]
11. Václavík, V.; Daxner, J.; Valíček, J.; Dvorský, T.; Kusnerová, M.; Harnicárová, M.; Bendová, M.; Brenek, A. The use of industrial waste as a secondary raw material in restoration plaster with thermal insulating effect. *Adv. Mater. Res.* **2014**, *897*, 204–214. [[CrossRef](#)]
12. Crinaldesi, V.; Nardinocchi, A.; Jacopo, D. Lightweight aggregate mortars for sustainable and energy-efficient building. *Adv. Mater. Res.* **2014**, *980*, 142–146. [[CrossRef](#)]
13. Gadea, J.; Rodríguez, A.; Campos, P.L.; Garabito, J.; Calderón, V. Lightweight mortar made with recycled polyurethane foam. *Cem. Concr. Compos.* **2010**, *32*, 672–677. [[CrossRef](#)]
14. Junco, C.; Gadea, J.; Rodríguez, A.; Gutiérrez-González, S.; Calderón, V. Durability of lightweight masonry mortars made with white recycled polyurethane foam. *Cem. Concr. Compos.* **2012**, *34*, 1174–1179. [[CrossRef](#)]
15. Junco, C.; Rodríguez, A.; Calderón, V.; Muñoz-Rupérez, C.; Gutiérrez-González, S. Fatigue durability test of mortars incorporating polyurethane foam wastes. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *190*, 373–381. [[CrossRef](#)]
16. Gutiérrez-González, S.; Gadea, J.; Rodríguez, A.; Junco, C.; Calderón, V. Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam waste. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *28*, 653–658. [[CrossRef](#)]
17. Rodríguez, A.; Manso, J.M.; Aragón, A.; González, J.J. Strength and workability of masonry mortars manufactured with ladle furnace slag. *Resour. Conserv. Recycl.* **2009**, *53*, 645–651. [[CrossRef](#)]
18. Manso, J.M.; Rodríguez, A.; Aragón, A.; González, J.J. The durability of masonry mortars made with ladle furnace slag. *Constr. Build. Mater.* **2011**, *25*, 3508–3519. [[CrossRef](#)]
19. Prieto, M.I.; Cobo, A.; Rodríguez, A.; Calderón, V. Corrosion behavior of reinforcement bars embedded in mortar specimens containing ladle furnace slag in partial substitution of aggregate and cement. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *38*, 188–194. [[CrossRef](#)]
20. Prieto, M.I.; Cobo, A.; Rodríguez, A.; González, M.N. The efficiency of surface-applied corrosion inhibitors as a method for the repassivation of corroded reinforcement bars embedded in ladle furnace slag mortars. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *54*, 70–77. [[CrossRef](#)]
21. Santamaría-Vicario, I.; Rodríguez, A.; Gutiérrez-González, S.; Calderón, V. Design of masonry mortars fabricated concurrently with different Steel slag aggregates. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *95*, 197–206. [[CrossRef](#)]
22. Santamaría-Vicario, I.; Rodríguez, A.; Junco, C.; Gutiérrez-González, S.; Calderón, V. Durability behavior of steelmaking slag masonry mortars. *Mater. Des.* **2016**, *97*, 307–315. [[CrossRef](#)]
23. García-Cuadrado, J.; Rodríguez, A.; Cuesta, I.I.; Calderón, V.; Gutiérrez-González, S. Study and analysis by means of surface response to fracture behavior in lime-cement mortars fabricated with steelmaking slags. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *138*, 204–213. [[CrossRef](#)]
24. EN 197-1:2011: *Cement—Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements*; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2011.
25. EN 1015-10:2000: *Methods of Test for Mortar for Masonry. Part 10: Determination of Dry Bulk Density of Hardened Mortar*; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2000.



26. EN 12664:2002: *Thermal Performance of Building Materials and Products. Determination of Thermal Resistance by Means of Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Methods; Dry and Moist Products of Medium and Low Thermal Resistance*; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2002.
27. EN 1015-19:1999: *Methods of Test for Mortar for Masonry. Part 19: Determination of Water Vapour Permeability of Hardened Rendering and Plastering Mortars*; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 1999.
28. Serway, R.A.; Jewett, J.W. *Physics for Scientists and Engineers*, 6th ed.; Thomson: Scotland, UK, 2004.
29. TRNSYS. Available online: <http://www.trnsys.com/> (accessed on 8 May 2019).
30. Código Técnico de la Edificación. Ministerio de Fomento.Gobierno de España. Available online: <http://www.codigotecnico.org/> (accessed on 8 May 2019).



© 2019 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

ANEXO 3

Artículo:

“Ecological Design of New Efficient Energy-
Performance Construction Materials with
Rigid Polyurethane Foam Waste”



Article

Ecological Design of New Efficient Energy-Performance Construction Materials with Rigid Polyurethane Foam Waste

Raúl Briones-Llorente ¹, Ricardo Barbosa ², Manuela Almeida ²,
Eduardo Atanasio Montero García ¹ and Ángel Rodríguez Saiz ^{3,*}

¹ Department of Electromechanical Engineering, University of Burgos, Avenida de Cantabria s/n, 09006 Burgos, Spain; rbriones@ubu.es (R.B.-L.); emontero@ubu.es (E.A.M.G.)

² Department of Civil Engineering, University of Minho, Campus Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal; ricardobarbosa@civil.uminho.pt (R.B.); malmeida@civil.uminho.pt (M.A.)

³ Department of Architectonic Constructions, University of Burgos, Calle Villadiego s/n, 09001 Burgos, Spain

* Correspondence: arsaizmc@ubu.es; Tel.: +34-947-25-89-32

Received: 26 March 2020; Accepted: 30 April 2020; Published: 3 May 2020



Abstract: An ecological mortar is designed from industrial sub-products, with the objective of utilizing both the slag residues, generated during steel manufacturing processes, and the waste from Polyurethane Foam (PF) panels, generated during refrigerator chamber manufacturing processes. The ecological mortar design involves the dosing of Electric Arc Furnace (EAF) slag, together with finely ground Polyurethane Foam, cement, and additives. An energy efficient prefabricated block is designed with the mortar, for use in construction, and its energy performance is assessed as a material inserted within the envelope of a service sector (hospital) building, either as an exterior skin, or as an enclosing component within the façade interior. The main contribution of this research is the characterization of the thermo-physical and mechanical properties of a new prefabricated panel made with recycled materials. The full characterization of the properties of these new materials is presented and discussed. The new prefabricated panel demonstrates adequate thermo-mechanical characteristics as a substitute for traditional materials, while improving the sustainability of the building. As a secondary objective, the energy behaviour of the new panels when integrated in a real building is presented by means of a case study simulation. The use of computational thermal simulation confirmed that the properties of the prefabricated block influenced the annual thermal demand of the building for heating and cooling. Improvements to the thermal inertia of the building envelope were also confirmed with the inclusion of PF waste, giving the mortar an energy performance that was similar to conventional materials, in such a way that its use in façade construction may be validated, in addition to its environmental benefits, due to it having been manufactured with critical recycled industrial waste such as EAF slag and PF, thereby contributing to both the circular economy and sustainable development.

Keywords: computer simulation; ecological mortar; energy efficiency; polyurethane waste; prefabricated; slag

1. Introduction

At present, we are witnessing a new social revolution that seeks to raise awareness of the climatic changes that are happening on our planet and the danger that this implies regarding diversity [1–3]. New social models are attempting to seek responses to traditional industrial development, avoiding environmental impacts that contaminate and pollute, and minimizing the effects of global warming and the over-exploitation of natural resources [4–6]. In striving to avoid the collapse of our civilization,



effort must be invested in reducing our dependency on traditional raw materials, and seeking valid alternatives through the recycling and recovery of waste for industrial and scientific progress [7–9].

One technological innovation in construction has been the design of lightweight mortars for use in the manufacture of new construction materials, a circumstance that can substantially reduce the loads of structures and which contributes to the insulation of buildings [10–13]. In this sense, the use of PU waste for the manufacture of these lightweight mortars is one of the research lines developed over recent years within Building Material Research Groups, attempting to find a positive compatibility between the traditional components of mortars, and the Polyurethane Foam (PF) that is generated in industrial processes, such as the manufacture of automobiles and refrigeration installations [14–16]. In this way, a lightweight construction material can be produced that meets the minimum requirements for mechanical strength and that, at the same time, contributes to improving the energy conditions of buildings, because of its insulative properties, with low thermal and acoustic conductivity [17,18].

The investigation developed in this paper seeks to incorporate different polymer types used in industrial processing in the manufacture of construction products, integrating them as an extra component in the dosing of concretes, mortars, and plaster pastes, among others. Numerous authors have studied interactions between polymeric products and inorganic binders, with the objective of establishing their effects on the properties of the final products. Models have been proposed, in an attempt to explain the formation of paste microstructures, as well as their interactions with other components, such as aggregates and additives [19–21].

Likewise, as an alternative to the use of traditional aggregate for construction, research work has also been developed to recover industrial waste with similar properties, such as steel slag generated during the steel manufacturing process [22–24]. Traditionally, slags have been dumped in landfill sites with no defined use, with inevitable impacts on the landscape and on the ground upon which they accumulate. These wastes present similar properties to conventional aggregates and, in some cases, because of their nature and composition, show both hydraulic and pozzolanic behavior [25,26]. Slag from a Basic Oxygen Furnace (BOF) convertor has been used for the construction of roads and bituminous pavements [27–30]. Mortars and concretes with good mechanical properties and durability have been designed with Electric Arc Furnace (EAF) black slag [31–35]. Finally, white slag from the Ladle Furnace (LF) has been successfully used for the manufacture of Portland cement [36], as a fine aggregate in masonry mortars [37,38], and for the stabilization of expansive clayey soils [39,40].

Moreover, it is increasingly common in building to use prefabricated materials with insulative properties that, in turn, integrate recovered waste materials [41–49], thereby complying with European Directives on the energy performance of buildings [50] and on waste recycling, reutilization, and recovery [51]. Accordingly, the research developed within this study proposes the design of a utility construction model (a prefabricated block), using an ecological cement mortar that incorporates doses of both Polyurethane Foam (PF) waste from the fridge chamber manufacturing industry and Electric Arc Furnace (EAF) slag, reused as aggregate, from the steel manufacturing industry. Subsequently, its applicability to the industrialized construction of exterior walls is studied by testing its thermal performance.

With this work, the main aim is to achieve an ecological material that is respectful of the environment, manufactured with recycled and recovered materials and efficient from an energy point of view when incorporating recovered PF waste material, in coherence with the provisions of the European Directives on energy efficiency and waste recycling.

A secondary objective is testing how these new ecological materials contribute to comfort levels within buildings. Then, its energy performance as a construction material placed within the building envelope is simulated. In this case study, a service sector hospital building was selected, as these buildings consume energy on a large scale in the European Union, together with large hotels and commercial centres. Their specific energy consumption varies between 250 and 600 kWh/m², depending on the type of hospital, its size, its location and, of course, the state of its envelope and air-conditioning systems [52]. The comparison of some studies from the 1980s and 1990s [53–55] with other more

recent ones [56,57], including projects financed by the EU (RES-Hospitals, LCB Healthcare, Green hospitals, etc.), indicated that energy consumption in buildings has not significantly fallen, at least not in proportion to theoretical advances concerning envelopes and air-conditioning systems, and the implementation of the European Directive on the Energy Performance of Buildings (EDEPB) [58] after 2003.

2. Materials and Methods

The experimentation process includes two large sections. First, the study of the properties of the mortar used to manufacture the precast panel. Second, the simulation process using specific software to check its energy behavior when integrated on the facade of a building.

2.1. Utility Model Design

The objective of this research work is the design of a new ecological construction material, with a good technical performance, for use as an energy-efficient material in building enclosures.

The utility model that is designed is a tongue-and-groove block, with dimensions of $500.0 \times 250.0 \times 100.0$ mm, manufactured with the ecological mortar composed of cement, recovered steel slag, recycled PF waste, a suitable additive, and mix water. The design of the utility model and its geometry may be seen in Figure 1.



Figure 1. Ecological cement mortar block.

2.2. Materials

An ecological cement mortar was designed for the manufacture of the Utility Model, containing recovered industrial waste that adhered to the specifications of European standard EN 998-2:2018 Specification for mortar for masonry—Part 2: Masonry mortar [59] as a reference.

The basic materials used in the ecological mortar mix design for molding the prefabricated monolithic block were as follows:

Portland Cement CEM I 42.5 R was manufactured by the firm Cementos Portland Valderribas at its factory in Mataporquera (Cantabria, Spain), in accordance with the specifications of European standard EN 197-1:2011 [60]. Due to its characteristics, this cement is ideal for the preparation of prefabricated components, because it is composed of 95% Portland cement clinker and 5% lime. Its Blaine specific surface, $3400 \text{ cm}^2/\text{g}$, enables a rapid hydration and an ideal pouring time that facilitates the molding of each piece. Its principal characteristics are shown in Table 1.

Table 1. Technical characteristics of Portland Cement CEM I 42,5 R.

Element	Clinker	Limestone Filler	SO ₃	Cl	Ignition Loss	Insoluble Residue
% Mass	95.0	5.0	3.2	0.01	3.2	1.4

Electric Arc Furnace (EAF) black slag is an industrial sub-product from steel manufacturing. This waste had previously been weathered under laboratory conditions to stabilize the expansive

components—Calcium Oxide (CaO) and Magnesium Oxide (MgO)—by means of hydration, favouring its transformation into Portlandite (Ca(OH)₂) and brucite (Mg(OH)₂). Sieve sizes smaller than 8.0 mm. were selected and 97% of the slag was smaller than 4.0 mm, so it was designated as an arid Ø 0–4 mm, in accordance with European standard EN 13139:2002/AC: 2004 [61]. Its granulometric distribution is shown in Figure 2.

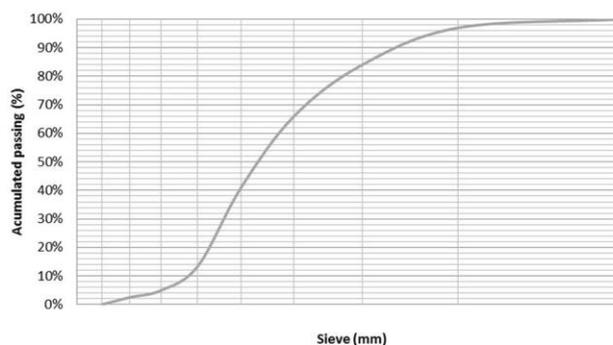


Figure 2. Granulometry Electric Arc Furnace Slag (EAF).

The slag, once stabilized, was analyzed with X-ray Fluorescence Spectroscopy, with a Thermo Electron Corporation ARL ADVAT XP Sequential XRF with Claisse Fluxy. The most important components identified from the analysis are shown in Table 2.

Table 2. Chemical composition of Electric Arc Furnace Slag (EAF).

Values	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	Cr ₂ O ₃	MnO	P ₂ O ₅	SO ₃	Others	Total
%	25.78	14.08	34.35	8.54	7.73	1.55	4.83	0.43	0.42	2.29	100.00

Polyurethane Foam (PF) is a waste sub-product from the cutting of sandwich-type panels fitted as thermal insulation inside refrigeration chambers for food transport, storage, conservation, and distribution. The foam was reduced in size by cutting, using an SM 100 RETSCH cutting mill. Subsequently, a granulometric analysis was performed with a Beckam Coulter LS 13 320 Analyzer, yielding a particle distribution by size that is shown in Figure 3.

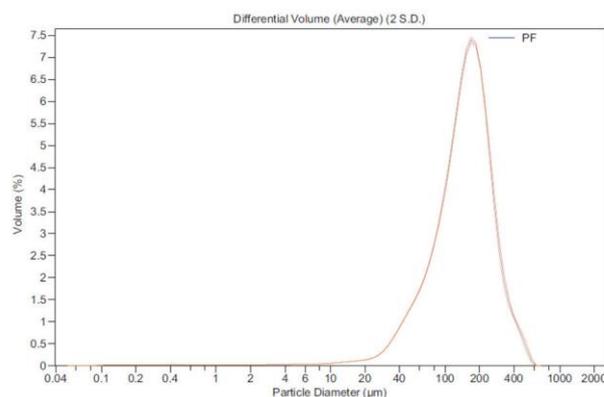


Figure 3. Granulated rigid polyurethane foam waste (PF).

The chemical composition of the PF, the result of CHNS elemental analysis with a LECO CHNS-932 analyzer and X-ray diffraction, is shown in Table 3.

Table 3. Chemical composition of rigid polyurethane foam (PF).

Sample PU (mg)	Values	C	O	N	H	S	Others	Total
1.170	Mass (%)	54.0	4.9	7.5	11.7	0.0	21.9	100.0

An air entrainer–plasticizer additive was used to reduce the surface tension between the dosed water and the mortar components, favouring its hydration. The additive, dosed at 0.8% by weight of cement, was supplied in powder form by the firm BASF.

The water used for mixing the solid components of the mortar was taken directly from the mains water supply of the Sociedad Municipal Aguas de Burgos (Burgos Municipal Water Corporation, Burgos, Spain).

2.3. Technical Criteria for Dosing the Mortar

The mortar was dosed in accordance with a component by volume ratio (RV) of [1:(1 + 3):1] for the components (cement/EAF + PU/water). As the ecological mortar design will be used for molding prefabricated pieces, the incorporation of the air entrainer–plasticizer additive reduced the mix water, but maintained good workability, with a slump on the flow table of 150 ± 10 mm. The components of the mixture are shown in Table 4.

Table 4. Ecological mortar components.

Values	CEM I 42,5R R	EAF	PU	Additive	Water
Ratio Volume	1	1	3	-	1.1
Weight (g)	600	1118.4	129.24	4.8	660

2.4. Properties and Features of Mortars

The ecological design mortar was characterized in accordance with the specifications of European standard EN 998-2:2016 [54]. Table 5 shows a summary of the different test results.

Table 5. Properties of the ecological mortar.

Standard	Test	Values
Fresh mortar		
EN 1015-6:1999	Bulk density of fresh mortar	1321.40 kg/m ³
EN 1015-7:1999	Air content of fresh mortar	37.0%
Hardened mortar		
EN-1015-10:1999	Dry bulk density of hardened mortar	1058.00 kg/m ³
EN 1015-11:2000/A1:2007	Flexural strength	7D-0.76 N/mm ² 28D-1.55 N/mm ²
	Compressive strength	7D-2.01 N/mm ² 28D-3.85 N/mm ²
EN 1015-12:2016	Adhesive strength on ceramic substrate	0.11 N/mm ²
	Adhesive strength on mortar substrate	0.27 N/mm ²
EN 1015-18:2003	Water absorption by capillarity	$c = 0.2083 \text{ Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$
EN 1015-19:1999	Water vapor permeability	$\mu = 5$
EN 13755:2008	Water absorption at atmospheric pressure	25.78%

2.4.1. Density and Air Content of Fresh Mortar

Fresh and hardened density and occluded air were measured at a temperature of 20 ± 1 °C and a relative humidity of $50 \pm 1\%$, according to European Standards EN 1015-6 and EN 1015-7 [62,63].

2.4.2. Dry Bulk Density of Hardened Mortar

The dry bulk density of the hardened mortar was determined in accordance with the specifications of European standard EN-1015-10 [64]. In accordance with its composition, the density of the hardened mortar was 1321.40 kg/m^3 , in other words, it presented a low density.

2.4.3. Mechanical Properties: Flexion, Compression and Adherence

Specimens prepared in molds, measuring $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$, were cured at $20 \text{ }^\circ\text{C}$ and 98% relative humidity, in order to determine the flexural and compressive strength of the mortar, as per standard EN 1015-11 [65]. The samples were tested both at 7 and at 28 days of age and three flexural tests were performed, with a separation of the supporting rollers of 100 mm. The resulting fragments were subjected to six compressive strength tests performed on a surface area of $(40 \times 40) \text{ mm}$.

The compressive strengths of the different mortars at 28 days (3.85 N/mm^2) are shown below in Table 4, hence its classification as M-2.5.

The resistance to adherence was determined in accordance with European standard EN 1015-12 [66], taking as a reference a porous ceramic surface and a ceramic tile manufactured from the same material, as shown in Figure 4. The results on the ceramic surface (0.11 N/mm^2) and the mortar tile (0.27 N/mm^2) indicated that the design mortar easily adhered to both surfaces.

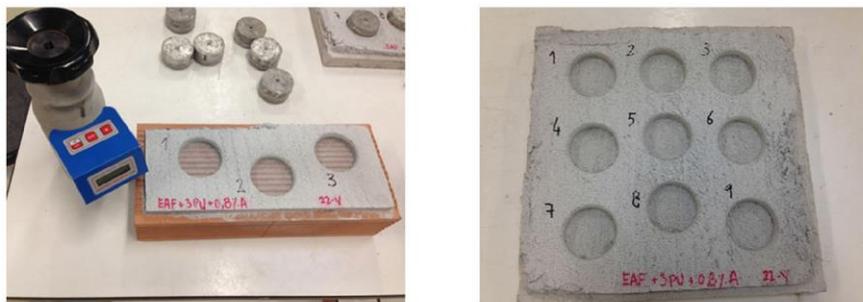


Figure 4. Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates.

2.4.4. Determination of Water Absorption Coefficient in Hardened Mortar

The determination of the water absorption coefficient, due to the capillary action of hardened mortar, was performed in accordance with the test specified in European standard EN 1015-18 [67], applied to six standardized specimens of $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$. Likewise, the height of the water, drawn upwards by capillarity action, was determined as shown in Figure 5.



Figure 5. Determination of water absorption coefficient in hardened mortar.

In accordance with European standard EN 1015-18 [67], the classification of the Capillarity Absorption Coefficient ($c = 0.2083 \text{ Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$) value of the mortar corresponded to W2 ($c \leq 0.2 \text{ Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$), the water ascending to an average height of 10.0 mm.

2.4.5. Determination of Water Vapour Permeability

The water vapour permeability level of the mortar was determined by European standard EN 1015-19 [68]. To do so, three cylindrical specimens were molded and each one was sealed within a mold with a saturated saline solution inside. The recipients holding the specimens were maintained in a water temperature-controlled environment and under a constant water pressure, differing from the interior pressure. By observing the weight variation in the two items, recipient and specimen, under long-term test conditions, the moisture vapour transmission rate through the mortar, shown in Figure 6, was determined.

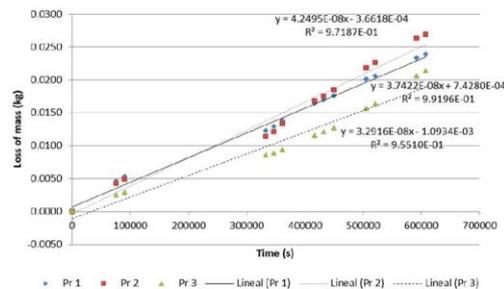


Figure 6. Determination of water vapour permeability.

The mean value of the water vapour permeability of the three test specimens tested was $4.30564 \times 10^{-11} \text{ kg}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$, and the Water Vapour Diffusion Resistance Factor (μ) is 4.

2.4.6. Determination of Water Absorption at Atmospheric Pressure

As no specific regulation exists on mortar water absorption at atmospheric pressure, the procedure for natural rocks established in standard EN 13755 [69] was used and can be partially justified by the stony nature of the mortar texture.

To perform the test, three cubic specimens of $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ were used, taking the average absorption of the three specimens as a reference, as shown in Table 6. The absorption of water at atmospheric pressure is expressed as the percentage weight of absorbed water.

Table 6. Water absorption at atmospheric pressure.

Test	Sample			
	1	2	3	Mean
Dry Weight (g)	268.60	267.60	265.90	267.37
Saturated Weight (g)	336.40	337.30	335.20	336.30
Water absorption at atmospheric pressure (%)	25.24	26.05	26.06	25.78

2.4.7. Determination of Specific Heat of Mortar

The specific heat (C_p) of the mortar with foams was determined in the Applied Physics Laboratory of the University of Burgos, using a High-Temperature Differential Scanning Calorimeter, applying the Mixture Method (obtaining the determination of specific heat by means of a comparative method and standard samples). The experimental test results yielded a specific heat of $1291.76 \text{ J}/\text{kgK}$. for the ecological mortar design.

2.4.8. Determination of Thermal Conduction Coefficient

Mortar tiles with dimensions of 30 mm × 30 mm × 2 mm were manufactured and tested with the procedure established in European standard EN 12664 [70]. The test results are shown in Table 7.

Table 7. Thermal conductivity of ecological mortar.

Standard	Test		$e, \text{Ws}^{\frac{1}{2}}/\text{m}^2\text{K}$	$\lambda, \text{W/mK}$
EN 12664:2002	Determination of Thermal Resistance	Sample 1	635.72	0.280
		Sample 2	627.74	0.270
		Mean	631.73	0.275

Thermal effusivity (e). Thermal conductivity (λ).

2.5. Energy Simulation of the Building

The energy behaviour of the mortar block as a constructive element integrated within a real building in the two proposed types of façade simulation was studied and compared with the existing façade. The tests are useful for establishing whether this new material behaves at least equally to the conventional materials which it may replace.

The annual energy demand of the heating and cooling system on two storeys that are representative of the proposed building was studied, supposing that each of the three types of façades were installed. The three case studies proposed for each of the two storeys of the building were compared, thereby contributing information on the thermal behavior of this new construction material, which complements the hygro-thermal characterization, the condensation study, and the thermal inertia tests previously carried out.

As indicated earlier, the energy simulation was performed with a Transient System Simulation (TRNSYS v.17, Thermal Energy System Specialists, LLC, Madison, WI, USA) software package [71], an extremely flexible graphic-environment based software package that is used to simulate energy flows within transitory systems, such as buildings. It consists of two parts: the first processes the input data, computes the system by iteration, determines convergence values, and lists the system variables. The second part is an extensive component library of use for modeling the functioning of any one part of the system.

The chosen case of study is the University Hospital of Burgos (HUBU), situated in Burgos, in the North of Spain. It was inaugurated in 2012, making it a good example of a modern hospital. Burgos has a similar continental climate to other central European cities.

Beginning with the composition of the actual façade of the building, the behavior of the material is studied in the form of a block for masonry constructions, under two scenarios: (i) substituting the exterior layer of the existing façade, as a visible component; and, (ii) substituting the innermost layer of the façade, with no interior finishes.

The criterion of at least not worsening and whenever possible improving the thermal behavior of these two new façade options is tested with respect to the existing façade. In the first phase, thermal transmittance, the risk of surface and interstitial condensation, and thermal inertia is studied on all three façades.

In the second phase, the influence of using each façade option on the annual thermal demand for heating and for cooling of the building is studied. The study involves a computational thermal simulation of two representative storeys with two different uses within the building.

The main objective of this research is the characterization of the thermo-physical and mechanical properties of a new prefabricated panel made with recycled materials. The first part of the article is devoted to the precise characterization of the properties of these new materials in accordance with European standards. A detailed description of the experimental techniques and the obtained results are shown. Then, as a secondary objective, the energy behaviour of the new panels when integrated in a real building, is presented by means of a case study simulation in the second part of the article.

2.5.1. Building Geometry

Two storeys of two representative areas with different uses within the hospital were simulated. The simulations completed with TRNSYS [71] are shown in Figures 7 and 8.

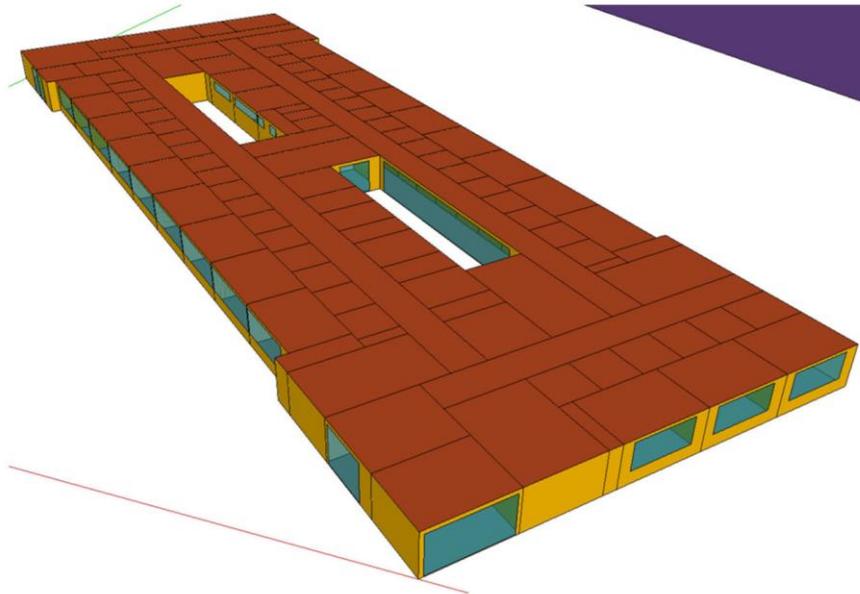


Figure 7. Transient System Simulation (TRNSYS) energy simulation of the hospital inpatient ward floor.

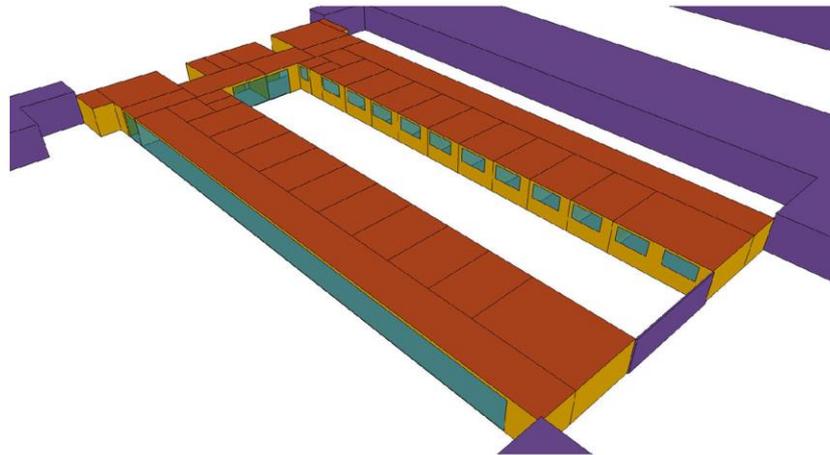


Figure 8. TRNSYS energy simulation of the hospital outpatient consultation floor.

The hospital inpatient ward floor measures 72.85 m in length and 26.36 m in maximum width, measured from the exterior wall. The free-standing interior height is 2.70 m. It is not situated on the ground, but is raised on piles over three storeys.

The hospital outpatient consultation floor measures 50.75 m in length and has a maximum width of 27.38 m, measured from the exterior. The interior free-standing height was 2.70 m. It is the third storey of the building, below the hospital inpatient ward floor, that is also studied in this paper.

Both floors are offset from the east–west direction. The longest façades are rotated by 40° and the shortest façades are rotated by 50°, both along an east–west axis, as shown in Figures 9 and 10.

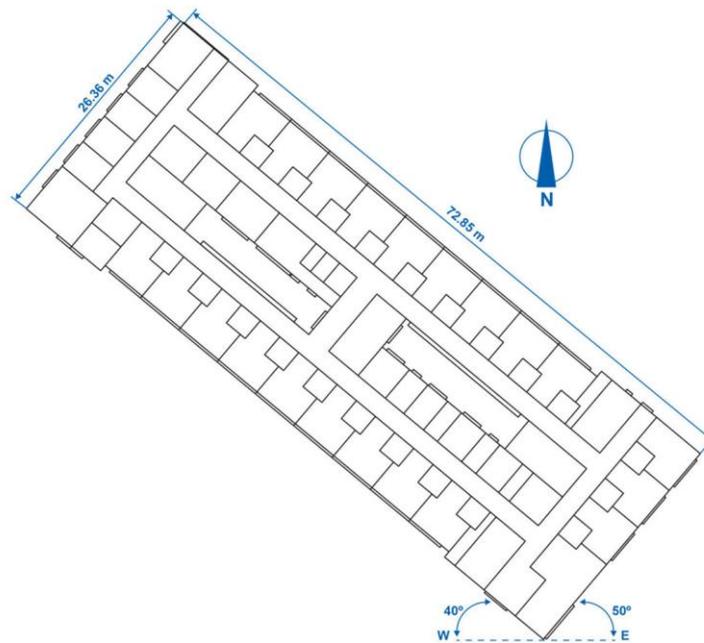


Figure 9. Geometry of the hospital inpatient ward floor.

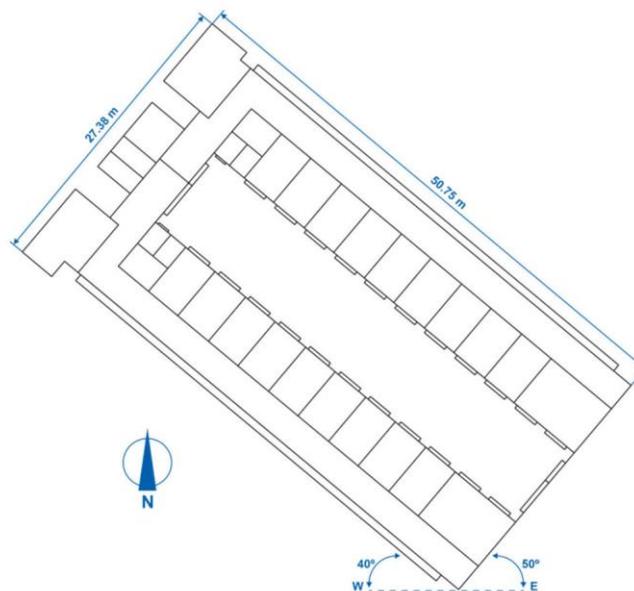


Figure 10. Geometry of the hospital outpatient consultation floor.

2.5.2. Constructive Characteristics of the Building

The exterior enclosures and the interior partitions were fitted in layers and are in agreement with TRNSYS [71], taking into account the physical characteristics of the materials of each layer.

The convective heat-transfer coefficients of the building enclosures are detailed in Table 8, and are in agreement with the Basic Document DA DB-HE/1, of the Spanish Building Code [72].

Table 8. Convective heat transfer coefficients of the building enclosures.

Position	Heat Flow	R_{so} , $m^2 \times K/W$	R_{si} , $m^2 \times K/W$
Vertical (façade)	Horizontal	0.040	0.130
Horizontal (ceiling)	Vertical and ascending	0.040	0.100
Horizontal (floor)	Vertical and descending	0.040	0.170

Outside convective heat transfer coefficient (R_{so}). Inside convective heat transfer coefficient (R_{si}).

The solar absorptance values of the building enclosures are detailed in Table 9, and are in agreement with DA DB-HE/1 [72].

Table 9. Solar absorptance values.

Building Enclosure	Surface	Color	Tone	α
Floor	Interior	Grey	Medium	0.65
Floor	External	Grey	Medium	0.65
Ceiling	Interior	White	Medium	0.30
Façade	External	Green	Dark	0.88
Façade	Interior	White	Medium	0.30
Interior partition	Interior	White	Medium	0.30

Solar absorptance (α).

All the thermal bridges on both floors of the building were identified and processed for display with DA DB-HE/2 [73]. The values of their linear thermal transmittance are detailed in Table 10, and are in agreement with the Spanish Building Code [74].

Table 10. Linear thermal bridges.

Linear Thermal Bridges	ψ , $W/m \times K$
Interior floor–façade	0.42
Exterior floor–façade	0.43
Projection corner	0.15
Entering corner	0.01
Window edge	0.24
Pillar–façade	0.84

Linear thermal transmittance. (ψ).

Double-glazed windows were used with a sealed air chamber (4/15/4 mm) and an aluminium frame with a thermal break. Their characteristics are shown in Table 11.

Table 11. Window features.

Material	U , $W/m^2 \times K$	g	α	A_{fr}/A_w , %	R_{so} , $m^2 \times K/W$	R_{si} , $m^2 \times K/W$	Q_{100} , $m^3/h \times m^2$
Glazing	1.430	0.605	—	—	—	—	—
Frame	2.900	—	0.650	—	—	—	—
Glazing + frame	—	—	—	23.000	0.040	0.130	<3.000

Thermal transmittance (U). Solar factor (g). Solar absorptance (α). Area of a frame divided by area of a window (A_{fr}/A_w). Outside convective heat transfer coefficient (R_{so}). Inside convective heat transfer coefficient (R_{si}). Permeability under a lab pressure of 100 Pa (Q_{100}).

2.5.3. Operational Conditions of the Building

The hospital inpatient ward floor is busy on all days of the week. Patients are admitted who are receiving medical treatment and, likewise, receive visits from family and friends. There are no high internal heat gains due to the occupancy levels, lighting, and equipment.

The outpatient consultation floor is occupied from Monday to Friday, but only in the mornings. It contains the consulting rooms where the doctors receive the patients for examination and discussion

of their possible illnesses and treatments. There are moderate internal heat gains due to the level of occupancy, but low gains with regard to lighting and equipment.

The two user profiles were generated with TRNSYS [71], using as a starting point the profiles that appear in the Spanish Building Codes [74] “Non-residential use over 24 h of low intensity” and “Non-residential use over 8 h of average intensity”, respectively, and taking into account the information supplied by the managers of the hospital. The internal heat gains due to lighting were calculated considering the 80 lm/W compact fluorescent lighting and the average horizontal illuminance, which was 500 lux.

The numerical values that defined both user profiles are shown in Tables 12–17.

Table 12. Set-point temperatures and mechanical ventilation in the user profile for the hospital inpatient ward floor.

Days of the Year	Schedule—Set-Point Heating Temperature (low)	T , °C
Every day	0h00–23h00	20.00
Days of the Week	Schedule—Set-Point Cooling Temperature (high)	T , °C
Every day	0h00–23h00	25.00
Days of the Week	Schedule—Mechanical Ventilation	ren/h
Every day	0h00–23h00	0.80

Temperature (T).

Table 13. Internal heat gains in the user profile for the hospital inpatient ward floor.

Owing to	Days of the Week	Schedule	IHG, W/m ²
Sensible occupation	Every day	0h00–23h00	2.00
Latent occupation	Every day	0h00–23h00	1.26
Lighting	Every day	0h00–23h00	6.25
Equipment	Every day	0h00–23h00	1.50

Internal heat gains (IHG).

Table 14. Total internal heat gains in the user profile for the hospital inpatient ward floor.

Hours	0h00–23h00
IHG, W/m ²	11.01

Internal heat gains (IHG).

Table 15. Set-point temperatures and mechanical ventilation schedules of the user profile for the hospital outpatient consultation floor.

Days of the Year	Schedule—Set-Point Heating Temperature (low)	T , °C
Working days	0h00–6h00 and 15h00–23h00	—
	7h00–14h00	20.00
Saturdays, Sundays and Holidays	0h00–23h00	—
Days of the Week	Schedule—Set-Point Cooling Temperature (high)	T , °C
Working days	0h00–6h00 and 15h00–23h00	—
	7h00–14h00	25.00
Saturdays, Sundays and Holidays	0h00–23h00	—
Days of the Week	Schedule—Mechanical Ventilation	ren/h
Working days	0h00–6h00 and 15h00–23h00	—
	7h00–14h00	0.80
Saturdays, Sundays and Holidays	0h00–23h00	—

Temperature (T).

Table 16. Internal heat gains in the user profile for the hospital outpatient consultation floor.

Owing to	Days of the week	Schedule	IHG, W/m ²
Sensible occupation	Working days	0h00–6h00 and 15h00–23h00	—
	Saturdays, Sundays and Holidays	7h00–14h00	6.00
Latent occupation	Working days	0h00–23h00	—
	Saturdays, Sundays and Holidays	0h00–6h00 and 15h00–24h00	—
Lighting	Working days	7h00–14h00	3.79
	Saturdays, Sundays and Holidays	0h00–23h00	—
Equipment	Working days	0h00–6h00 and 15h00–23h00	—
	Saturdays, Sundays and Holidays	7h00–14h00	4.50
		0h00–23h00	—

Internal heat gains (IHG).

Table 17. Total internal heat gains in the user profile for hospital outpatient consultation floor on working days.

Hours	0h00–6h00	7h00–14h00	15h00–23h00
IHG, W/m ²	0.00	20.54	0.00

Internal heat gains (IHG).

The definition of the air-conditioning system is not among the objectives of this investigative work.

2.5.4. Climatic Conditions

The hospital under study is situated in the city of Burgos, in the north of Spain. It is on a latitude of 42°17'10" north and its longitude is 3°27'22" west. Its height above sea level is 861 m. This city has one of the severest winter climates in Spain, according to the Spanish Building Code [74]. The average monthly temperature is shown in Table 18.

Table 18. Monthly average air temperature in Burgos.

T, °C											
January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
3.1	4.1	7.0	8.6	12.2	16.5	19.5	19.5	16.1	11.5	6.6	3.9

Temperature (T).

2.6. Hygro-Thermal Behaviour of the Mortar Block

Exterior enclosures and interior partitions of the building were generated layer-by-layer, from the interior toward the exterior, with the Transient System Simulation (TRNSYS v.17, Thermal Energy System Specialists, LLC, Madison, WI, USA) software package [71]. The geometric and thermophysical characteristics of the three facades are shown in Tables 19–21. Some constructive sections are depicted in Figure 11.

Table 19. Geometrical and thermophysical properties of the existing façade.

Material	t, m	λ, W/(m K)	C _p , J/(kg K)	δ, kg/m ³	R _n , (m ² K)/W
Plasterboard	0.013	0.250	1000.000	825.000	—
Non-woven geotextile	0.010	0.060	1300.000	200.000	—
MW insulation	0.060	0.031	1000.000	40.000	—
Steel profiles	0.008	50.000	450.000	7800.000	—
MW insulation	0.020	0.041	1000.000	40.000	—
Ventilated air chamber	0.100	—	—	—	0.095
Slate cladding	0.040	2.200	1000.000	2400.000	—

 Thickness (t). Thermal conductivity (λ). Specific heat (C_p). Density (δ). Thermal resistance of a layer (R_n).

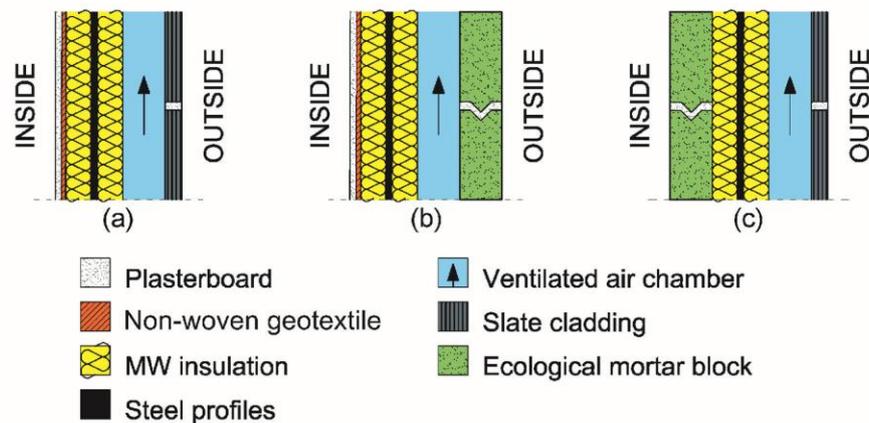
Table 20. Geometrical and thermophysical properties of the façade with the ecological mortar block outward.

Material	t , m	λ , W/(m K)	C_p , J/(kg K)	δ , kg/m ³	R_{n_i} (m ² K)/W
Plasterboard	0.013	0.250	1000.000	825.000	—
Non-woven geotextile	0.010	0.060	1300.000	200.000	—
MW insulation	0.060	0.031	1000.000	40.000	—
Steel profiles	0.008	50.000	450.000	7800.000	—
MW insulation	0.020	0.041	1000.000	40.000	—
Ventilated air chamber	0.100	—	—	—	0.095
Ecological mortar block	0.100	0.275	1291.760	1058.000	—

 Thickness (t). Thermal conductivity (λ). Specific heat (C_p). Density (δ). Thermal resistance of a layer (R_{n_i}).

Table 21. Geometrical and thermophysical properties of the façade with the ecological mortar block inward.

Material	t , m	λ , W/(m K)	C_p , J/(kg K)	δ , kg/m ³	R_{n_i} (m ² K)/W
Ecological mortar block	0.100	0.275	1291.760	1058.000	—
MW insulation	0.060	0.031	1000.000	40.000	—
Steel profiles	0.008	50.000	450.000	7800.000	—
MW insulation	0.020	0.041	1000.000	40.000	—
Ventilated air chamber	0.100	—	—	—	0.095
Slate cladding	0.040	2.200	1000.000	2400.000	—

 Thickness (t). Thermal conductivity (λ). Specific heat (C_p). Density (δ). Thermal resistance of a layer (R_{n_i}).

Figure 11. Constructive sections of the façades. (a) Current façade. (b) Façade with the ecological mortar block outward. (c) Façade with the ecological mortar block inward.

The general characteristics of the three façades are shown below, in Table 22.

Table 22. Features of the three types of façades.

Façade	t , m	U , W/(m ² K)	w , kg/m ²
Existing	0.251	0.342	174.320
Exterior ecological mortar block layer	0.311	0.306	184.125
Interior ecological mortar block layer	0.328	0.326	267.400

 Thickness (t). Thermal transmittance (U). Weight (w).

2.7. Surface and Interstitial Condensation

Subsequently, the risk of superficial and interstitial condensation was studied on each of the three façades under study. The program eCondensa2 [75], implementing the calculation method that can be found in DA DB-HE/2 [73], forms part of the Spanish Building Code [74], which is, in turn, the Spanish transposition of the European Directive [58].

These values of superficial and interstitial condensation were calculated for the city of Burgos in January, the month in which the exterior conditions were least favourable (2.6 °C) and the relative humidity was high (86.0%). The interior conditions were: temperature (20.0 °C) and relative humidity (55.0%).

2.8. Thermal Inertia

The thermal inertia variations of the existing façade were studied, having changed their composition by fitting exterior mortar blocks and interior mortar blocks, as is detailed in Tables 19–21, respectively.

When the mortar blocks are fitted to the exterior, they replace the slate cladding, and are thicker and have a higher specific heat. They are placed over the thermal insulation layer, facing outwards.

When the mortar blocks are placed within the interior, they replace the laminated gypsum panels and non-woven geotextile. Their greater thickness and density mean that they have a higher specific heat than the laminated gypsum panel, but a lower specific weight than the non-woven geotextile. They are placed under the thermal insulation, towards the interior.

Five magnitudes were calculated in relation to the thermal inertia for the three façades that were proposed. Thermal inertia (1) is the capability of a material to store energy that depends on its mass, its density, and its specific heat. The materials with higher thermal inertia will take longer to reach thermal equilibrium with the surrounding media when a thermal gap exists between both:

$$I = (\lambda \times \delta \times C_p)^{1/2}, J/(m^2 \times K \times s^{1/2}) \quad (1)$$

The second magnitude that will be studied is thermal mass (2), which is the quantity of heat that a body is capable of absorbing and storing:

$$m_t = \delta \times C_p \times t, J/(m^2 \times K) \quad (2)$$

The third magnitude is the thermal constant (3), which shows the reaction time of a body following changes to the exterior temperature:

$$CTT = [R_{se} + (0.5 \times R_1)] \times m_{t1} + [R_{se} + R_1 + (0.5 \times R_2)] \times m_{t2} \\ + \dots + [R_{se} + R_1 + R_2 + \dots + (0.5 \times R_n)] \times m_{tn}, s \quad (3)$$

The fourth magnitude is the useful thermal mass (4), which is the thermal mass of the construction materials placed between the layer of thermal insulation and the interior, and which is capable of accumulating energy:

$$m_{tu} = CTT/R_T, J/(m^2 \times K) \quad (4)$$

The fifth magnitude is the useful thermal mass percentage (5), which is the relationship between the useful thermal mass and the total thermal mass of the façade:

$$\% m_{tu} = m_{tu}/m_t, \% \quad (5)$$

3. Results and Discussion

3.1. Utility Model Designed

The apparent density of the in-fresh mortar was determined with the test specifications from European standard EN 1015-6, obtaining a value of 1321.4 kg/m^3 . This density produces a material with a low slump (150 mm), but can be easily placed due to the incorporation of the air entrainer–plasticizer, water reducer additive, which helps mold the pieces. The dry plastic consistency of the mortar was adjusted, to meet the specifications of European standard EN 1015-6 [62], in other words, with a consistency of $160 \pm 10 \text{ mm}$.

An air occlusion value of 37% was achieved in the mortar with the air entrainer–plasticizer additive, giving it an extensive capillary network through which water vapour can transpire, thereby preventing any possible accumulation of humidity in the internal zones of the building enclosures. A behavior that the water vapour permeability test results confirmed where the resistance factor, μ , to water vapour diffusion was $\mu = 5$, making it a mortar that permitted the water vapour to pass through it quite easily.

Nevertheless, once the capillarity water absorption test was over, although the capillary network was large, it was seen that the pores were not sufficiently wide for the water to rise through the interstitial network of the mortar (Jurin’s Law). In accordance with European standard EN 1015-18 [67], the Water Absorption Coefficient by capillarity value ($c = 0.2083 \text{ Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$) graded the mortar as W2, quite an impermeable mortar, with good resistance to water filtration—properties which are proven by the average height of the ascension of the water, which was only 10 mm.

3.2. Surface and Interstitial Condensations

Tables 23–25 show the results of the calculations for the three façades. The layers of the different materials that form the façades were ordered, from the exterior to the interior, to be able to compute those calculations. The graphs of water pressure against saturation pressure for the three façades throughout the month of January are shown in Figures 12–14.

Table 23. Condensation on the current façade.

Surface		Interstitial							
$f_{Rsi} \geq f_{Rsi,min}$	$P_n \leq P_{sat,n}$	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5	Layer 6	Layer 7	
f_{Rsi}	0.915	$P_{sat,n}$, Pa	754.453	785.198	963.519	963.583	2053.814	2185.170	2227.629
$f_{Rsi,min}$	0.640	P_n , Pa	633.091	633.091	633.091	963.583	1088.379	1187.826	1285.323
Material	t , m	λ , W/(m K)	μ	R_n , (m ² K)/W	U , W/(m ² K)	P_{vap} , Pa	P_{sat} , Pa	Accumulated Condensation, kg	
Slate cladding	4.0	2.2000	800	0.0182	55.0000	633.091	754.453	0.0000	
Ventilated air chamber	10.0	1.0526	1	0.0950	10.5263	633.091	785.198	0.0000	
MW insulation	2.0	0.0405	1	0.4938	2.0250	633.091	963.519	0.0000	
Steel profiles	0.8	50.0000	1×10^{15}	0.0002	6250.0000	963.583	963.583	2.4942	
MW insulation	6.0	0.0310	1	1.9355	0.5167	1088.379	2053.814	0.0000	
Non-woven geotextile	1.0	0.0600	5	0.1667	6.0000	1187.826	2185.170	0.0000	
Plasterboard	1.3	0.2500	4	0.0520	19.2308	1285.323	2227.629	0.0000	
Totals	25.1	—	—	2.9310	0.3420	—	—	—	

Interior surface temperature factor (f_{Rsi}). Minimum interior surface temperature factor ($f_{Rsi,min}$). Vapor pressure of a layer (P_n). Saturation pressure of a layer ($P_{n,sat}$). Thickness (t). Thermal conductivity (λ). Factor of resistance to water vapor diffusion (μ). Thermal resistance of a layer (R_n). Thermal transmittance (U). Vapor pressure (P_{vap}). Saturation pressure (P_{sat}).

Table 24. Condensations in the façade with the ecological mortar block outward.

Surface		Interstitial							
$f_{Rsi} \geq f_{Rsi,min}$	$P_n \leq P_{sat,n}$	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5	Layer 6	Layer 7	
f_{Rsi}	0.924	$P_{sat,n}$, Pa	856.368	887.061	1062.757	1062.819	2082.175	2200.754	2238.940
$f_{Rsi,min}$	0.640	P_n , Pa	633.091	633.091	633.091	1062.819	1149.123	1217.898	1285.323
Material	t , m	λ , W/(m K)	μ	R_n , (m ² K)/W	U , W/(m ² K)	P_{vap} , Pa	P_{sat} , Pa	Accumulated condensation, kg	
Ecological mortar block	10.0	0.2750	5	0.3636	2.7500	633.091	856.368	0.0000	
Ventilated air chamber	10.0	1.0526	1	0.0950	10.5263	633.091	887.061	0.0000	
MW insulation	2.0	0.0405	1	0.4938	2.0250	633.091	1062.757	0.0000	
Steel profiles	0.8	50.0000	1×10^{15}	0.0002	6250.0000	1062.819	1062.819	1.5371	
MW insulation	6.0	0.0310	1	1.9355	0.5167	1149.123	2082.175	0.0000	
Non-woven geotextile	1.0	0.0600	5	0.1667	6.0000	1217.898	2200.754	0.0000	
Plasterboard	1.3	0.2500	4	0.0520	19.2308	1285.323	2238.940	0.0000	
Totals	31.1	—	—	3.2770	0.306	—	—	—	

Interior surface temperature factor (f_{Rsi}). Minimum interior surface temperature factor ($f_{Rsi,min}$). Vapor pressure of a layer (P_n). Saturation pressure of a layer ($P_{n,sat}$). Thickness (t). Thermal conductivity (λ). Factor of resistance to water vapor diffusion (μ). Thermal resistance of a layer (R_n). Thermal transmittance (U). Vapor pressure (P_{vap}). Saturation pressure (P_{sat}).

Table 25. Condensations in the façade with the ecological mortar block inward.

Surface		Interstitial						
$f_{Rsi} \geq f_{Rsi,min}$	$P_n \leq P_{sat,n}$	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5	Layer 6	
f_{Rsi}	0.919	$P_{sat,n}$, Pa	753.582	782.824	951.557	951.616	1962.311	2232.679
$f_{Rsi,min}$	0.640	P_n , Pa	633.091	633.091	633.091	951.616	988.889	1285.323
Material	t , m	λ , W/(m K)	μ	R_n , (m ² K)/W	U , W/(m ² K)	P_{vap} , Pa	P_{sat} , Pa	Accumulated Condensation, kg
Slate cladding	4.0	2.2000	800	0.0182	55.0000	633.091	753.582	0.0000
Ventilated air chamber	10.0	1.0526	1	0.0950	10.5263	633.091	782.824	0.0000
MW insulation	2.0	0.0405	1	0.4938	2.0250	633.091	951.557	0.0000
Steel profiles	0.8	50.0000	1×10^{15}	0.0002	6,250.0000	951.616	951.616	0.7516
MW insulation	6.0	0.0310	1	1.9355	0.5167	988.889	1962.311	0.0000
Ecological mortar block	10.0	0.2750	5	0.3636	2.7500	1285.323	2232.679	0.0000
Totals	32.8	—	—	3.0760	0.3260	—	—	—

Interior surface temperature factor (f_{Rsi}). Minimum interior surface temperature factor ($f_{Rsi,min}$). Vapor pressure of a layer (P_n). Saturation pressure of a layer ($P_{n,sat}$). Thickness (t). Thermal conductivity (λ). Factor of resistance to water vapor diffusion (μ). Thermal resistance of a layer (R_n). Thermal transmittance (U). Vapor pressure (P_{vap}). Saturation pressure (P_{sat}).

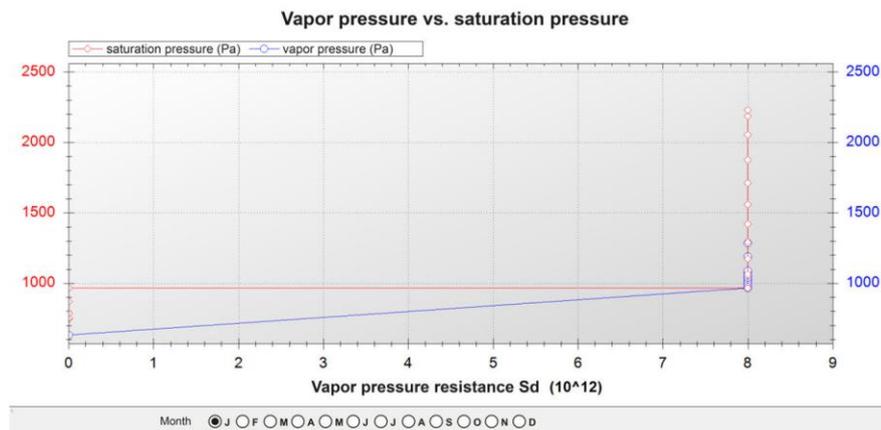


Figure 12. Pressure graph of the current façade.

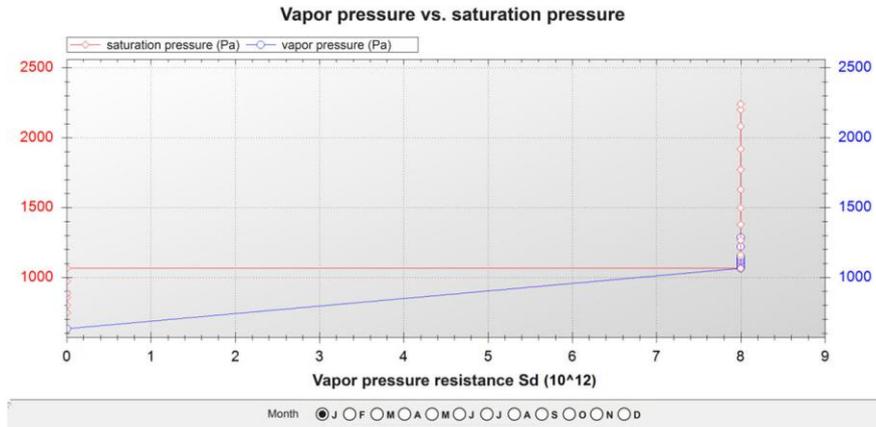


Figure 13. Pressure graph of the façade with the ecological mortar block outward.

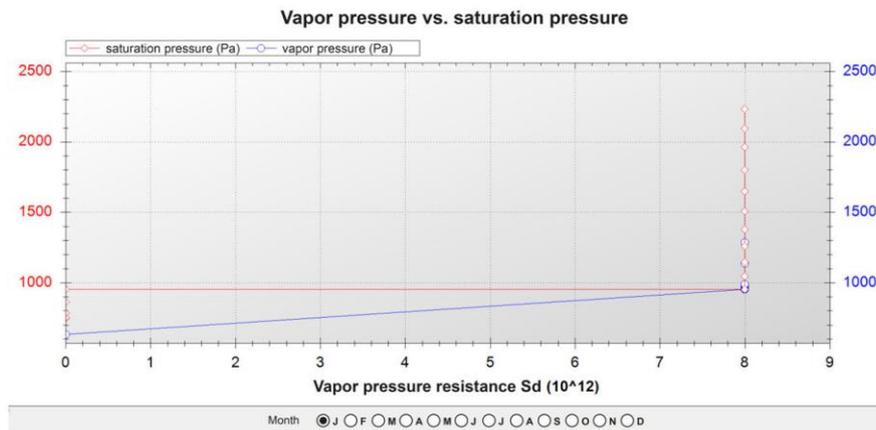


Figure 14. Pressure graph of the façade with the ecological mortar block inward.

In the three cases:

- There is no risk of surface condensation;
- There is no condensation on the thermal insulation layers;
- There is an accumulation of condensation on the layers of steel profiles, but in the annual balance, the accumulated amount of condensation was inferior to the evaporation levels.

3.3. Thermal Inertia

Table 26 shows the results of the calculations of all five thermal inertia-related magnitudes for the three façades, previously explained in Section 2.8.

Table 26. Thermal inertia of the façades.

Façade	I J/(m ² × K × s ^{1/2})	m_t J/(m ² × K)	CTT s	m_{tu} J/(m ² × K)	% m_{tu} %
Current	16,199.977	140,605.000	63,775.714	21,756.66	15.47
With the ecological mortar block outward	14,515.208	181,273.208	104,787.480	31,978.85	17.64
With the ecological mortar block inward	16,233.985	263,948.208	404,894.150	131,617.71	49.86

Thermal inertia (I). Thermal mass (m_t). Thermal constant (CTT). Useful thermal mass (m_{tu}). Useful thermal mass percentage (% m_{tu}).

With regard to the total thermal inertia of each façade, the existing one and the one with interior mortar blocks presented very similar values, and the one with the exterior mortar blocks showed a slightly lower simulated value.

The thermal mass values ordered from low to high would be as follows:

- Existing façade < façade with exterior mortar blocks < façade with the interior blocks;
- The rising values are due to the thermal mass of the mortar block layers, greater than the thermal mass of the material layers that they replaced, considering the existing façade;
- The thermal constant, the useful thermal mass, and the useful thermal mass percentage increased by the same proportions as the previous magnitude;
- The high thermal constant of the façade with the interior blocks with respect to the other two façades attracts attention. It indicates that its temperature will take much longer to vary when the interior and exterior temperatures vary. It will, for example, conserve the heat accumulated during the day for longer, which will then slowly dissipate during the night towards the interior spaces, as it is in contact with them, and the insulative thermal layer will prevent most of the thermal flow from passing toward the exterior;
- In the same sense, the useful thermal mass and the percentage of useful thermal mass are also much greater on the interior mortar block layers of the façade, because these layers add greater density, specific heat, and thickness to the insulative thermal layer toward the interior;
- The composition of the interior mortar block layer of the façade is therefore interesting in those spaces where an accumulation of heat or cold is sought in the walls, so that it subsequently dissipates towards the interior space;
- However, when the opposite is desired, and no accumulation of heat or cold is desired in the walls that can dissipate towards the interior, both the façade with exterior mortar blocks and the composition of the existing façade would be more appropriate.

3.4. Energy Simulation of the Building

The results of the annual energy demand for heating and cooling after completing six energy simulations of the three types of façade by means of [71] are shown in Table 27, for the hospital inpatient ward floor and for the outpatient consultations floor, respectively. The total annual results, normalized to the useful floor area, are shown to facilitate their comparison.

Table 27. Yearly heating and cooling energy demands.

Hospital Floor	Façade	Heating Energy Demands		Cooling Energy Demands	
		kWh/Year	kWh/(m ² × Year)	kWh/Year	kWh/(m ² × Year)
Hospital inpatient ward floor	Existing	161,986.27	94.71	15,053.79	8.80
	Exterior ecological mortar block	161,217.55	94.26	14,969.17	8.75
	Interior ecological mortar block	160,674.54	93.94	14,091.91	8.24
Hospital outpatient consultations floor	Current	54,462.48	62.32	8171.31	9.35
	Exterior ecological mortar block	54,198.18	62.02	8242.97	9.43
	Interior ecological mortar block	54,878.39	62.80	8209.38	9.39

In an initial global analysis, and taking into account the operational conditions of the building described in Section 2.5.3, it can be seen that the hospital inpatient ward floor has (approximately) a 50% higher heating demand than the hospital outpatient consultations floor. Taking into account that the constructive characteristics are similar, and that they have the same orientation, this may be due to the hospital inpatient ward floor having three times the daily hours of use of the hospital outpatient consultations floor, and also half of the internal loads that imply free heating.

In contrast, the hospital outpatient consultations floor has (approximately) a 10% higher cooling demand than the hospital inpatient ward floor. Despite the shorter period of utilization, this higher demand may be due to the higher quantity of internal loads, and because, outside the period of use, the ventilation will not be functioning. There will therefore be no free cooling during nocturnal hours, which is especially necessary in the summertime, as the hospital inpatient ward floor has this characteristic.

The energy heating demand was, approximately, eleven and seven times higher than the cooling demand of the hospital inpatient ward floor and the hospital outpatient consultations floor, respectively. This higher demand was due to the harsher conditions of the winter climate simulated for the city of Burgos, in comparison with those of summer, as explained in Section 2.5.4.

It can be seen from the analysis of the constructive compositions of the three façades that their results are very similar. These results are due to the very similar thermal transmittance values of the three enclosures, as may be seen in Table 22. The ecological mortar blocks represent only one component of the thermal envelope of the storeys that are under study, as a high surface area of the façades is also glazed, so any modification of opaqueness is low.

The energy heating demands, ordered from high to low, would be as follows:

- Hospital inpatient ward floor: existing façade > façade with the exterior recycled mortar blocks > façade with interior recycled mortar blocks. The latter façade, despite its higher thermal transmittance than the previous façade, is the façade with higher thermal inertia values, as may be seen from Table 26;
- Hospital outpatient consultations floor: façade with interior recycled mortar blocks > current façade > façade with the exterior recycled mortar blocks. Here, too, the thermal inertia values may be of greater influence than the thermal transmittance values.

The energy demands of cooling, ordered from highest to lowest, would be as follows:

- Hospital inpatient ward floor: existing façade > façade with the exterior recycled mortar blocks > façade with the interior recycled mortar blocks. The same was applicable to this storey as for the analysis of heating demand;
- Hospital outpatient consultations floor: façade with the exterior recycled mortar blocks > façade with the interior recycled mortar blocks > existing façade. The demand coincides with the rising values of thermal transmittance. As this floor is not in continuous use, the effect of thermal inertia will be lower;



- In any case, the three façades showed very similar energy behaviours over one year, which validated the recycled mortar blocks that were used to replace both slate as an exterior cladding, and the gypsum and cardboard panelling and non-woven geo-textiles as interior layers.

4. Conclusions

An ecological mortar cement has been designed with the addition of industrial Polyurethane Foam (PF) waste for use as a recovered material in the manufacture of ecological cement blocks that can be used to improve the thermal performance of constructive elements on building façades. This results in the reduced use of raw materials, which are replaced by recovered materials that will no longer be disposed of as waste materials, which implies a double saving in materials, energy and toxic environmental emissions. In addition, the positive effect that the incorporation of this recovered PF waste has on the energy performance of the design material has been confirmed.

The incorporation of the prefabricated mortar blocks designed with recovered materials has been studied on the façades of two storeys of a hospital block with different uses. The façade has been analyzed in its existing state and in two alternative cases, replacing their exterior and their interior layers with these blocks.

In a detailed comparative study of the three types of façades, it was concluded that: (i) they presented very similar thermal transmittance values; (ii) there was no risk of surface or interstitial condensation, nor of any effect on thermal insulation; (iii) an interior layer of blocks on the façade greatly improved its thermal inertia, which is desirable in the hospital inpatient ward floor in continuous use; (iv) the placement of the mortar blocks as an exterior layer implied similar thermal inertia values to the existing façade and less than in the earlier case; for this reason, a more limited use is suggested for the hospital outpatient consultations floor.

Six energy simulations have been conducted of the two storeys with the three types of façades, in order to understand the influence of each one on the annual energy behaviour of each storey. The influence of exterior climatic conditions may be appreciated, as well as for the two user profiles that have been proposed. However, energy behaviour in response to heating and cooling demand for the three façades was very similar for each of the two storeys under study.

Based on the results obtained with this detailed double analysis and the analysis of annual energy behaviour, the use of the recycled mortar blocks to replace the other conventional constructive elements within the building can be validated, as they provide similar performance levels, thereby maintaining the criteria of, at the very least, not worsening and possibly improving the performance of the building, in addition to the environmental benefits of reusing recovered industrial waste.

Author Contributions: R.B.-L., E.A.M.G. and Á.R.S. Methodology, R.B.-L., M.A. and R.B. Software, R.B.-L., E.A.M.G. and Á.R.S. Formal analysis, R.B.-L., M.A., R.B., E.A.M.G. and Á.R.S. Investigation, R.B.-L. Data curation, R.B.-L. and Á.R.S. Writing—original draft preparation, review, and editing, R.B.-L., M.A., and E.A.M.G. Supervision, E.A.M.G. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León (España), grant number GIR D02V.03 2018-2021.

Acknowledgments: This work is part of the Doctoral Thesis of Raúl Briones Llorente, and it has been funded by the Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León (Spain) and co-funded by the Operational Programme European Social Fund. The authors thanks to the company “EFICANZA” for the supply of constructive and operational data of the building.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.



References

1. Caballero, M.; Lozano, S.; Ortega, B. Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: Una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Rev. Digit. Univ.* **2007**, *8*, 2–12.
2. Moss, R.H.; Edmonds, J.A.; Hibbard, K.A.; Manning, M.R.; Rose, S.K.; Van Vuuren, D.P.; Meehl, G.A. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* **2010**, *463*, 747. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
3. Arnell, N.W.; Lloyd-Hughes, B. The global-scale impacts of climate change on water resources and flooding under new climate and socio-economic scenarios. *Clim. Chang.* **2014**, *122*, 127–140. [[CrossRef](#)]
4. Ianos, I.; Peptenatu, D.; Zamfir, D. Respect for environment and sustainable development. *Carpath. J. Earth Environ. Sci.* **2009**, *4*, 81–93.
5. Pearce, D.; Barbier, E.; Markandya, A. *Sustainable Development: Economics and Environment in the Third World*, 1st ed.; Routledge: London, UK, 2013.
6. Meadowcroft, J. Who is in charge here? Governance for sustainable development in a complex world. *J. Environ. Pol. Plan.* **2007**, *9*, 299–314. [[CrossRef](#)]
7. Tam, V.W.; Tam, C.M. A review on the viable technology for construction waste recycling. *Resour. Conserv. Recycl.* **2006**, *47*, 209–221. [[CrossRef](#)]
8. Sarkis, J.; Helms, M.M.; Hervani, A.A. Reverse logistics and social sustainability. *Corp. Soc. Responsib. Environ. Manag.* **2010**, *17*, 337–354. [[CrossRef](#)]
9. Kothari, R.; Tyagi, V.V.; Pathak, A. Waste-to-energy: A way from renewable energy sources to sustainable development. *Renew. Sust. Energ. Rev.* **2010**, *14*, 3164–3170. [[CrossRef](#)]
10. Del Río Merino, M.; Astorqui, J.S.C.; Cortina, M.G. Viability analysis and constructive applications of lightened mortar (rubber cement mortar). *Constr. Build. Mater.* **2007**, *21*, 1785–1791. [[CrossRef](#)]
11. Molina, W.M.; Guzman, E.A.; Garcia, H.C.; Gomez, C.L.; Valdez, F.G.; Lica, O.F.; Barrios, H.H. Mechanical Response of Portland Cement Mortars with Added Expanded Polystyrene Spheres (EPS) under Accelerated Attack. In Proceedings of the 2015 International Conference on Structural, Mechanical and Material Engineering, Dalian, China, 6–8 November 2015; Atlantis Press: Paris, French, 2015.
12. Muñoz-Ruipérez, C.; Rodríguez, A.; Gutiérrez-González, S.; Calderón, V. Lightweight masonry mortars made with expanded clay and recycled aggregates. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *118*, 139–145. [[CrossRef](#)]
13. Corinaldesi, V.; Nardinocchi, A.; Donnini, J. Lightweight aggregate mortars for sustainable and energy-efficient building. In *Advanced Materials Research*; Trans Tech Publications: Stafa-Zurich, Switzerland, 2014; Volume 980, pp. 142–146.
14. Gadea, J.; Rodríguez, A.; Campos, P.L.; Garabito, J.; Calderón, V. Lightweight mortar made with recycled polyurethane foam. *Cem. Concr. Compos.* **2010**, *32*, 672–677. [[CrossRef](#)]
15. Gutiérrez-González, S.; Gadea, J.; Rodríguez, A.; Junco, C.; Calderón, V. Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *28*, 653–658. [[CrossRef](#)]
16. Ferrándiz-Mas, V.; Bond, T.; García-Alcocel, E.; Cheeseman, C.R. Lightweight mortars containing expanded polystyrene and paper sludge ash. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *61*, 285–292. [[CrossRef](#)]
17. San-Antonio-González, A.; Merino, M.D.R.; Arrebola, C.V.; Villoria-Sáez, P. Lightweight material made with gypsum and extruded polystyrene waste with enhanced thermal behaviour. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *93*, 57–63. [[CrossRef](#)]
18. Corinaldesi, V.; Donnini, J.; Nardinocchi, A. Lightweight plasters containing plastic waste for sustainable and energy-efficient building. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *94*, 337–345. [[CrossRef](#)]
19. Jansen, D.; Goetz-Neunhoffer, F.; Neubauer, J.; Haerzschel, R.; Hergeth, W.D. Effect of polymers on cement hydration: A case study using substituted PADMA. *Cem Concr Compos* **2013**, *35*, 71–77. [[CrossRef](#)]
20. Wang, R.; Yao, L.; Wang, P. Mechanism analysis and effect of styrene-acrylate copolymer powder on cement hydrates. *Constr Build Mater.* **2013**, *41*, 538–544. [[CrossRef](#)]
21. Beeldens, A.; Van Gemert, D.; Schorn, H.; Ohama, Y.; Czarnecki, L. From microstructure to macrostructure: An integrated model of structure formation in polymer-modified concrete. *Mater. Struct.* **2005**, *38*. [[CrossRef](#)]
22. Tsakiridis, P.E.; Papadimitriou, G.D.; Tsivilis, S.; Koroneos, C. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. *J. Hazard. Mater.* **2008**, *152*, 805–811. [[CrossRef](#)]



23. Kourounis, S.; Tsivilis, S.; Tsakiridis, P.E.; Papadimitriou, G.D.; Tsibouki, Z. Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag. *Cem. Concr. Res.* **2007**, *37*, 815–822. [[CrossRef](#)]
24. Netinger, I.; Bjegović, D.; Vrhovac, G. Utilisation of steel slag as an aggregate in concrete. *Mater. Struct.* **2011**, *44*, 1565–1575. [[CrossRef](#)]
25. Muhmood, L.; Vitta, S.; Venkateswaran, D. Cementitious and pozzolanic behavior of electric arc furnace steel slags. *Cem. Concr. Res.* **2009**, *39*, 102–109. [[CrossRef](#)]
26. Yildirim, I.Z.; Prezzi, M. Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. *Adv. Civil Eng.* **2011**, *2011*, 463638.
27. Mahieux, P.Y.; Aubert, J.E.; Escadeillas, G. Utilization of weathered basic oxygen furnace slag in the production of hydraulic road binders. *Const. Build. Mater.* **2009**, *23*, 742–747. [[CrossRef](#)]
28. Huang, L.S.; Zou, G.L.; Luo, H.L.; Chao, C.C. In-situ temperature effects in basic oxygen furnace slag asphalt concrete pavement. *Int. J. Pavement Res.* **2013**, *6*, 386–394.
29. Haritonovs, V.; Zaumanis, M.; Brencis, G.; Smirnovs, J. Asphalt concrete performance with conventional and waste aggregates. *Int. J. Pavement Res.* **2013**, *6*, 505–510.
30. Revilla-Cuesta, V.; Skaf, M.; Faleschini, F.; Manso, J.M.; Ortega-López, V. Self-compacting concrete manufactured with recycled concrete aggregate: An overview. *J. Clean Prod.* **2020**, 121362. [[CrossRef](#)]
31. Manso, J.M.; Losañez, M.; Polanco, J.A.; Gonzalez, J.J. Ladle furnace slag in construction. *J. Mater. Civ. Eng.* **2005**, *17*, 513–518. [[CrossRef](#)]
32. Abu-Eishah, S.I.; El-Dieb, A.S.; Bedir, M.S. Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region. *Const. Build. Mater.* **2012**, *34*, 249–256. [[CrossRef](#)]
33. Arribas, I.; Santamaría, A.; Ruiz, E.; Ortega-López, V.; Manso, J.M. Electric arc furnace slag and its use in hydraulic concrete. *Const. Build. Mater.* **2015**, *90*, 68–79. [[CrossRef](#)]
34. Pasetto, M.; Baliello, A.; Pasquini, E.; Skaf, M.; Ortega-López, V. Performance-Based Characterization of Bituminous Mortars Prepared with Ladle Furnace Steel Slag. *Sustainability* **2020**, *12*, 1777. [[CrossRef](#)]
35. Rashad, A. Cementitious materials and agricultural wastes as natural fine aggregate replacement in conventional mortar and concrete. *J. Build. Eng.* **2016**, *5*, 119–141. [[CrossRef](#)]
36. Vilaplana, A.S.D.G.; Ferreira, V.J.; López-Sabirón, A.M.; Aranda-Usón, A.; Lausín-González, C.; Berganza-Conde, C.; Ferreira, G. Utilization of ladle furnace slag from a steelwork for laboratory scale production of Portland cement. *Const. Build. Mater.* **2015**, *94*, 837–843. [[CrossRef](#)]
37. Rodríguez, A.; Manso, J.M.; Aragón, A.; Gonzalez, J.J. Strength and workability of masonry mortars manufactured with ladle furnace slag. *Resour. Conserv. Recycl.* **2009**, *53*, 645–651. [[CrossRef](#)]
38. Santamaría-Vicario, I.; Rodríguez, A.; Gutiérrez-González, S.; Calderón, V. Design of masonry mortars fabricated concurrently with different steel slag aggregates. *Const. Build. Mater.* **2015**, *95*, 197–206. [[CrossRef](#)]
39. Manso, J.M.; Ortega-López, V.; Polanco, J.A.; Setién, J. The use of ladle furnace slag in soil stabilization. *Const. Build. Mater.* **2013**, *40*, 126–134. [[CrossRef](#)]
40. Maghool, F.; Arulrajah, A.; Horpibulsuk, S.; Du, Y.J. Laboratory evaluation of ladle furnace slag in unbound pavement-base/subbase applications. *J. Mater. Civ. Eng.* **2016**, *29*, 04016197. [[CrossRef](#)]
41. Cetiner, I.; Shea, A.D. Wood waste as an alternative thermal insulation for buildings. *Energy Build.* **2018**, *168*, 374–384. [[CrossRef](#)]
42. Zhu, M.; Ji, R.; Li, Z.; Wang, H.; Liu, L.; Zhang, Z. Preparation of glass ceramic foams for thermal insulation applications from coal fly ash and waste glass. *Const. Build. Mater.* **2016**, *112*, 398–405. [[CrossRef](#)]
43. Moussa, T.; Maalouf, C.; Ingraio, C.; Scrucca, F.; Costantine, G.; Asdrubali, F. Bio-based and recycled-waste materials in buildings: A study of energy performance of hemp-lime concrete and recycled-polyethylene terephthalate façades for office facilities in France and Italy. *Sci. Technol. Built Environ.* **2018**, *24*, 492–501. [[CrossRef](#)]
44. Patnaik, A.; Mvubu, M.; Muniyasamy, S.; Botha, A.; Anandjiwala, R.D. Thermal and sound insulation materials from waste wool and recycled polyester fibers and their biodegradation studies. *Energy Build.* **2015**, *92*, 161–169. [[CrossRef](#)]
45. Briones-Llorente, R.; Calderón, V.; Gutiérrez-González, S.; Montero, E.; Rodríguez, Á. Testing of the Integrated Energy Behavior of Sustainable Improved Mortar Panels with Recycled Additives by Means of Energy Simulation. *Sustainability* **2019**, *11*, 3117. [[CrossRef](#)]



46. Mateus, R.; Neiva, S.; Bragança, L.; Mendonça, P.; Macieira, M. Sustainability assessment of an innovative lightweight building technology for partition walls—comparison with conventional technologies. *Build. Environ.* **2013**, *67*, 147–159. [[CrossRef](#)]
47. Santamaría Vicario, I.; Alameda Cuenca-Romero, L.; Gutiérrez González, S.; Calderón Carpintero, V.; Rodríguez Saiz, Á. Design and Characterization of Gypsum Mortars Dosed with Polyurethane Foam Waste PFW. *Materials* **2020**, *13*, 1497. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
48. Malanho, S.; Veiga, R. Bond strength between layers of ETICS—Influence of the characteristics of the components (mortars and insulation materials). *J. Build. Eng.* **2020**, *28*, 101021. [[CrossRef](#)]
49. Barczewski, M.; Kurańska, M.; Sałasińska, K.; Michałowski, S.; Prociak, A.; Uram, K.; Lewandowski, K. Rigid polyurethane foams modified with thermoset polyester-glass fiber composite waste. *Polym. Test* **2020**, *81*, 106190. [[CrossRef](#)]
50. Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 Amending Directive 2010/31/EU on the Energy Performance of Buildings and Directive 2012/27/EU on Energy Efficiency; European Union: Brussels, Belgium, 2018.
51. Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 Amending Directive 2008/98/EC on Waste; European Union: Brussels, Belgium, 2018.
52. Buildings Performance Institute Europe. *Europe's Building under the Microscope*; BPIE Report; Buildings Performance Institute Europe: Brussels, Belgium, 2011; pp. 52–58.
53. Adderley, A.E.; O'Callaghan, P.W.; Probert, S.D. Optimising the choice of energy thrift measures for hospitals. *Appl. Energy* **1988**, *30*, 153–160. [[CrossRef](#)]
54. Adderley, A.E.; O'Callaghan, P.W.; Probert, S.D. Energy-signature characteristic of a hospital. *Appl. Energy* **1989**, *34*, 125–153. [[CrossRef](#)]
55. Santamouris, M.; Dascalaki, E.; Balaras, C.; Argiriou, A.; Gaglia, A. Energy performance and energy conservation in health care buildings in Hellas. *Energy Conv. Manag.* **1994**, *35*, 293–305. [[CrossRef](#)]
56. García-Sanz-Calcedo, J.; López-Rodríguez, F.; Cuadros, F. Quantitative analysis on energy efficiency of health centers according to their size. *Energy Build.* **2014**, *73*, 7–12. [[CrossRef](#)]
57. Rohde, T.; Martínez, R.; Mysen, M. Activity modeling for energy-efficient design of new hospitals. *Int. J. Fac. Manag.* **2014**, *5*.
58. Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the Energy Performance of Buildings (Recast: Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings); European Union: Brussels, Belgium, 2010.
59. European Committee for Standardization. *Specification for Mortar for Masonry—Part 2: Masonry Mortar*; EN 998-2:2018; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2018.
60. European Committee for Standardization. *Cement—Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements*; EN 197-1:2011; British Standards Institution: London, UK, 2011.
61. European Committee for Standardization. *2004 Aggregates for Mortar*; EN 13139/AC; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2004.
62. European Committee for Standardization. *Methods of Test for Mortar for Masonry—Part 6: Determination of Bulk Density of Fresh Mortar*; EN 1015-6:1999; British Standards Institution: London, UK, 1999.
63. European Committee for Standardization. *Methods of Test for Mortar for Masonry—Part 7: Determination of Air Content of Fresh Mortar*; EN 1015-7:1999; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 1999.
64. European Committee for Standardization. *Methods of Test for Mortar for Masonry—Part 10: Determination of Dry Bulk Density of Hardened Mortar*; EN-1015-10:1999; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 1999.
65. European Committee for Standardization. *Methods of Test for Mortar for Masonry—Part 11: Determination of Flexural and Compressive Strength of Hardened Mortar*; EN 1015-11:2000/A1:2007; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2007.
66. European Committee for Standardization. *Methods of Test for Mortar for Masonry—Part 12: Determination of Adhesive Strength of Hardened Rendering and Plastering Mortars on Substrates*; EN 1015-12:2016; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2016.
67. European Committee for Standardization. *Methods of test for Mortar for Masonry—Part 18: Determination of Water Absorption Coefficient Due to Capillary Action of Hardened Mortar*; EN 1015-18:2003; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2003.

68. European Committee for Standardization. *Methods of Test for Mortar for Masonry—Part 19: Determination of Water Vapour Permeability of Hardened Rendering and Plastering Mortars*; EN 1015-19:1999; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 1999.
69. European Committee for Standardization. *Natural Stone Test Methods—Determination of Water Absorption at Atmospheric Pressure*; EN 13755:2008; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2008.
70. European Committee for Standardization. *Thermal Performance of Building Materials and Products. Determination of Thermal Resistance by Means of Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Methods; Dry and Moist Products of Medium and Low Thermal Resistanc*; EN 12664:2002; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2002.
71. TRNSYS. Available online: <http://www.trnsys.com/> (accessed on 13 January 2020).
72. Código Técnico de la Edificación. Documento DA DB-HE/1 Cálculo de Parámetros Característicos de la Envolvente. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. Available online: https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/DA_DB-HE-1_Calculo_de_parametros_caracteristicos_de_la_envolvente.pdf (accessed on 13 January 2020).
73. Código Técnico de la Edificación. Documento DA DB-HE/2 Comprobación de Limitación de Condensaciones Superficiales e Intersticiales en los Cerramientos. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. Available online: https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/DA-DB-HE-2_-_Condensaciones.pdf (accessed on 13 January 2020).
74. Código Técnico de la Edificación. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. Available online: <https://www.codigotecnico.org/index.html> (accessed on 13 January 2020).
75. eCondensa2. Available online: <https://ecoeiciente.es/econdensa2/> (accessed on 13 January 2020).



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

ANEXO 4

Artículo:

“Cost-effective building renovation at district level combining energy efficiency & renewables – Methodology assessment proposed in IEA Annex 75 and a demonstration case study”



Contents lists available at ScienceDirect

Energy & Buildings

journal homepage: www.elsevier.com/locate/enb

Cost-effective building renovation at district level combining energy efficiency & renewables – Methodology assessment proposed in IEA-Annex 75 and a demonstration case study



Jon Terés-Zubiaga^{a,*}, Roman Bolliger^b, Manuela G. Almeida^c, Ricardo Barbosa^c, Jørgen Rose^d, Kirsten E. Thomsen^d, Eduardo Montero^e, Raúl Briones-Llorente^e

^aENEDI Research Group, Department of Energy Engineering, Faculty of Engineering of Bilbao, University of the Basque Country UPV/EHU, Plaza Ingeniero Torres Quevedo 1, 48013 Bilbao, Spain

^bINDP, Habsburgerstrasse 3, 6003 Luzern, Switzerland

^cDepartment of Civil Engineering, University of Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

^dDepartment of the Built Environment, Aalborg University, A C Meyers Vænge 15, DK-2450 Copenhagen, Denmark

^eDepartment of Electromechanical Engineering, University of Burgos, Avenida Cantabria, 09006 Burgos, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 1 April 2020

Revised 2 June 2020

Accepted 29 June 2020

Available online 5 July 2020

Keywords:

IEA-EBC Annex 75

Cost-Effective

District renovation

Energy Efficiency in Districts

Renewable Energy in Districts

Methodology

ABSTRACT

Building renovation plays a key role in reducing greenhouse gas emissions and achieving the climate protection goals. The district scale approach is one of the most effective approaches to accelerate this process of reducing the energy consumption in the building sector as increasing its renovation rates. In this context, the Energy in Buildings and Communities Programme of the IEA, IEA-EBC started in 2017 the project “Annex 75: Cost-Effective Building renovation at District Level Combining Energy Efficiency and Renewables” aiming to explore optimal opportunities of district renovations from a cost-benefit perspective. IEA Annex 75 is a co-operative effort of participants from 13 different countries: Austria, Belgium, China, Czech Republic, Denmark, Germany, Italy, The Netherlands, Norway, Portugal, Spain, Sweden and Switzerland. In this paper, key elements of the methodology developed in Annex 75 project are presented. This methodology aims to facilitate the identification of optimal solutions in different European countries, enabling to explore similarities and differences amongst them, with a particular focus on the balance between energy efficiency measures and renewable energy measures. After a detailed description of the developed methodology, it is also applied to a case study located in Portugal and results obtained are analysed in detail. The paper demonstrates the usefulness of the methodology for evaluating and identifying optimal solutions in renovations at district scale, as well as for successfully addressing the research questions investigated by the Annex 75 project. They also provide some insights regarding the specific case study, showing that, although district systems are not usual in the current Portuguese context, these centralised solutions in renovations at district level are cost-effective interventions that can lead to significant reductions of greenhouse gas emissions and non-renewable primary energy use.

© 2020 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

It is well known that over 40% of the global energy consumption and 30% of greenhouse gas (GHG) emissions are related to the building sector [1]. Already in 2007, the Intergovernmental Panel on Climate Change synthesis report identified that the building sector was the sector with the main economic mitigation potentials using technologies and practices expected to be available in 2030 (estimated from bottom-up studies) [2]. In this context, the

European Union (EU) adopted in 2007 the “2020 Climate and Energy Package” [3], and the roadmap was updated in October 2014 with the definition of the “2030 Climate & Energy Framework” [4]. As far as the building sector is concerned, the Directive 2012/27/EU on Energy Efficiency [5], which aims at increasing the energy efficiency for achieving aforementioned objectives, highlights the potential for saving primary energy (PE) of district heating and cooling systems, and it urges the Member States to carry out a comprehensive assessment of the mentioned potential. Earlier, the recast of the Energy Performance in Buildings Directive (EPBD) [6] involved a turning point on the path towards the improvement of the efficiency of the building stock. This directive

* Corresponding author.

E-mail address: jon.teres@ehu.eus (J. Terés-Zubiaga).

introduced two important concepts: cost-optimality and nearly Zero Energy Buildings (nZEB), but mainly focused on new buildings. However, taking into consideration the low rates of replacement of the building stock in Europe [7], new buildings clearly can only play a smaller role in the overall reduction of GHG emissions related to the building stock. Hence, the main challenge is linked to the existing building stock, and energy renovation will play a key role on the overall objective of facing climate change by reducing carbon emissions. As a consequence, as mentioned in [8], several cities around the world have established strategic targets for GHG reductions focused on the urban environment, including the building stock amongst the main target areas.

It is within this background that IEA-EBC launched in 2010 the project "Annex 56: Cost-Effective Energy and Carbon Emissions Optimization in Building renovation". This project involved 11 European countries with the aim of developing a methodology to enable cost-effective renovation of existing buildings by identifying the optimal balance point of energy efficiency (EE) and renewable energy supply (RES) measures in a cost/benefit perspective. The project went on until 2017 and it gave rise to several academic publications, which can be found in the literature [8,10–14] and in different reports, which are available on the website of the project [15].

However, building renovation rates have not reached targeted goals for many years [16], and there is a general agreement that it is necessary to accelerate these rates. Therefore, the district scale approach is considered to be as one of the potentially most effective approaches to speed up the process of reducing greenhouse gas emissions in the building sector. Moreover, this approach can also allow taking advantage of the interactions and synergies amongst the different buildings and optimising the implementation and integration of renewable energy sources. To implement this approach, municipalities and other stakeholders need methods and tools that support them to identify the potentials of different building clusters for reducing greenhouse gas emissions and energy consumption as well as the optimal solution in each case [8]. The idea of fostering integrated district-level energy efficiency renovation approaches are also mentioned by the European Union in different Commission recommendations, such as CR-EU 2019/786 of 8 May 2019 on building renovation [17]. This idea is furthermore indicated in the update of the EPBD in 2018, which states that the Commission "shall review this Directive by 1 January 2026 at the latest" and "as part of that review, (...) examine in what manner Member States could apply integrated district or neighbourhood approaches in Union building and energy efficiency policy (...) by means of overall renovation schemes applying to a number of buildings in a spatial context instead of a single building" [18].

As a consequence, a substantial amount of publications can be found in the literature focused on this field. One example is the already mentioned work published by S. Paiho et al. [8]. S. S. Castro et al. proposed in [19] a decision matrix as a tool to identify the most appropriate retrofit measures of an existing building. Another example is the work recently published by V. D'Alonzo et al. [20], where a methodology for the building stock analysis of the residential sector is presented, which integrates input data in a Geographical Information System, without using the "archetypes approach" and simulation tools. Several publications have also focused on more specific issues on this field, such as on evaluating the different available tools for this kind of assessments at district scale. One example is the work presented by S. Ferrari et al. in [21], focused on methods for estimating building energy demand at district level; or [22], which evaluates available tools for assessing energy systems for building clusters.

Based on all these references, the Annex 75 project aims to go further, by means of applying a comprehensive analysis which covers not only the energy, economic and environmental issues, but

also additional issues such as identifying opportunities and barriers on the relations between the different involved stakeholders or policies and incentives for boosting energy renovations. To do that, the methodology presented in this paper will be applied to different case studies located in different countries, in such a way that its application will allow to carry out a comparative analysis targeted to identified the optimal strategies and lessons learned which will be able to be extrapolated to any other district according to its specific conditions.

2. IEA-EBC Annex 75. Cost-effective building renovation at district level Combining energy efficiency & Renewables

In the context previously explained, IEA-EBC started in 2017 a new project "Annex 75: Cost-Effective Building renovation at District Level Combining Energy Efficiency and Renewables". The project involves 25 institutions from 13 different countries and, in this case, it explores the opportunities of building renovations from a cost-benefit perspective at district level.

The project aims at assisting in clarifying the cost-effectiveness of various approaches combining both EE and RES implementation and focusing on the optimal combination between them, with respect to various possible starting situations in a specific city district. Thus, in particular the following research questions (RQ) are investigated within the Annex 75 project:

- RQ1. What are cost-effective combinations between RES measures and EE measures to achieve far-reaching reductions in GHG emissions and PE use in urban districts meeting the pre-set targets?
- RQ2. How do related strategies compare in terms of cost-effectiveness and impacts with strategies that combine a decentralised switching of energy carriers to RES with EE measures on the buildings' envelopes?
- RQ3. Which factors determine the cost-efficient balance between efficiency measures on the buildings envelopes and measures to use RES, if far-reaching reductions in GHG emissions and PE use in urban districts are the targets?
- RQ4. To what extent does the cost-effectiveness of renovation measures on the building envelopes in the case of a local district heating system based on RES differ from the cost-effectiveness of such measures in case of a decentralised use of RES for heating in each individual building?

Given the current necessity to achieve a building stock free of greenhouse gas emissions, it is in particular investigated which approaches, taking into account various possibilities for energy efficiency measures and renewable energy measures, allow to achieve districts supplied entirely with renewable energies at least costs.

For answering these research questions, the project focuses on four specific objectives: i) to give an overview on various technology options, taking into account existing and emerging efficient technologies with potential to be successfully applied within that context; ii) to develop a methodology to be applied to urban districts in order to identify such cost-effective strategies; iii) to illustrate the development of such strategies in selected case studies and gather related best-practice examples; and finally, iv), to give recommendations to policy makers and energy related companies on how they can foster the uptake of cost-effective combinations.

As far as the second objective is concerned, a specific methodology is developed and applied in generic calculations as well as in parametric calculations based on real-world case studies. Through this application, it is intended to identify the factors that affect the cost-effectiveness of renovation strategies for urban districts, as

Table 1
Project approach to different typology-related issues.

Project Approach	
Environment (Urban – Suburban – Rural)	Focus on urban and suburban districts, because energy densities are higher than in rural districts, making district-based solutions therefore potentially more attractive
Size of Buildings (Single family – Multifamily)	Focus on districts containing multi-family residential buildings, also for reasons of potential attractiveness for district-based solutions
Available options of RES	Focus on districts where a large number of options are available (both in terms of RES as well as possibilities for renovation of building envelopes) to be able to compare several scenarios.
Initial Situation	Focus on districts currently heated mainly by fossil fuels (either through centralised or through decentralised systems).

well as evaluate synergies and trade-offs between RES measures and EE measures, and between individual and collective solutions.

The proposed methodology builds on the methodology developed for individual buildings in Annex 56 [23] extending it to the level of groups of buildings. This change of scale, as well as the objective of applying it in different contexts, involve some issues that should be taken into consideration. On the one hand, this methodology should be flexible enough to be applied to the different specific conditions existing in each country; on the other hand, to clearly define how to make comparisons between different cases and obtain consistent conclusions. The objective of the methodology is to support decision makers in the evaluation of the efficiency, impacts, cost-effectiveness and acceptance of different possible strategies for renovating urban districts, making the identification of the most suitable options easier. The project plans to develop or adapt one or more calculation tools to support the application of the methodology in case-specific assessments.

Hence, the objective of this paper is to describe the mentioned methodology in detail and demonstrate its use by applying it to an example of a case study located in Portugal, in the Picoto neighbourhood, a social housing neighbourhood built in the 90's and located in Braga region, in the north of Portugal.

The rest of the paper is organised as follows: section 3 gives a detailed description of the proposed methodology, where different assumptions and considerations related to energy as well as economic and environmental issues are presented. Based on mentioned basis, the general procedure for evaluating cost-effective renovation strategies is described in section 4, whereas the methodology is tested and demonstrated on a case-study located in Portugal in section 5. Finally, the main conclusions and remarks are addressed in section 6.

3. Methodology for assessing cost-effective building renovation strategies at district level: scope, system boundaries and framework conditions

In a similar way as defined by S. Paiho et al. in [8], this paper considers a “renovation at district scale” as a refurbishment of different buildings located in a same area and with a sort of relation amongst them, using the term “district” without referring to any juridical or administrative purpose.

Considering this global definition, the Annex 75 focuses mainly on residential districts, composed of both single and multifamily buildings. Districts with other buildings with similar characteristics, such as schools or simple office buildings without complex HVAC systems can be also considered. Complex HVAC systems refers to HVAC systems that are used not only for removing/replacing air in order to achieve a good indoor climate, but also include advanced control systems aimed at optimising the operation for heating and cooling such as, for instance, occupancy-based strategies for operating, or predictive control strategies for temperature control of air handling units. Typically, more complex HVAC systems would also require more detailed modelling, which is outside

the scope of the methodology. Even though considering different uses usually drives to a more optimal solution by increasing the synergies amongst the evaluated buildings, it makes the assessment more complex, without providing additional information on the focus of the aforementioned research questions of this project. As far as the size of the district is concerned, there is no limit in the proposed methodology and it will depend on the specific features of the evaluated district;

Finally, regarding the typology of districts, different distinctions could be made according to the environment, size of buildings, available options of RES and initial situation of a given district. The project approach to these issues is summarised in Table 1.

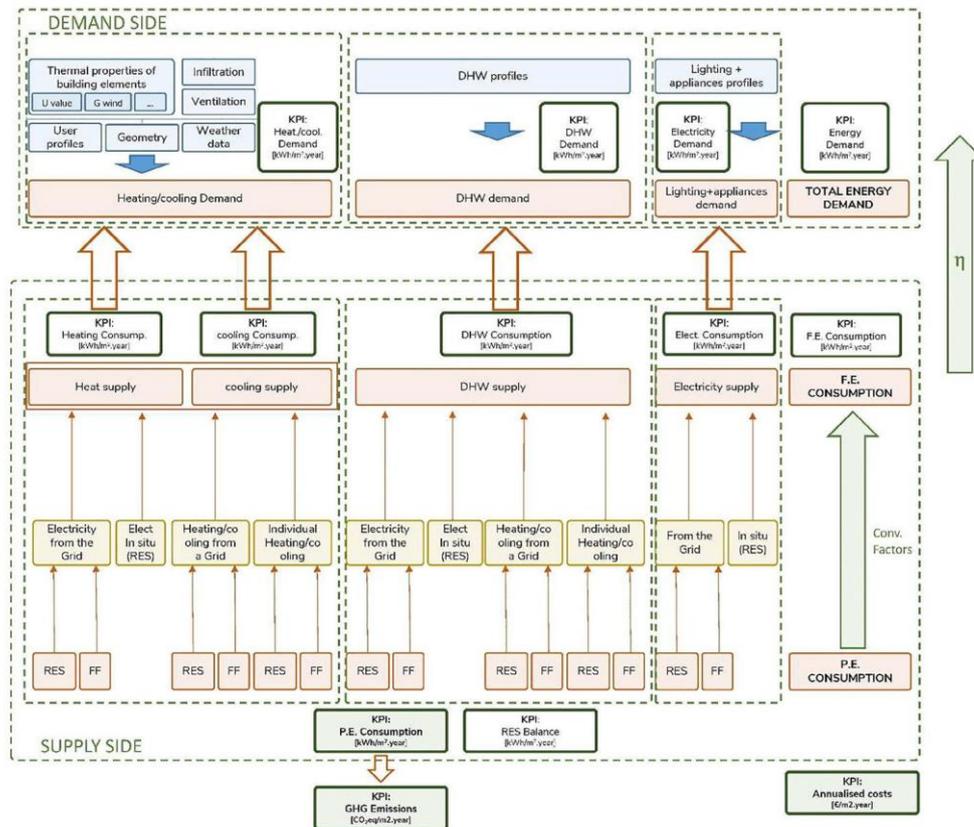
The assessment considers the energy use for space heating, space cooling, domestic hot water (DHW), ventilation, lighting and auxiliary electricity consumption for building integrated technical systems (fans, pumps, electric valves, etc.). Additionally, it is recommended to include electricity for appliances, as they contribute to electricity consumption and internal heat gains. Besides, it will also make it more feasible to evaluate the potential of onsite generation (e.g. photovoltaic systems) to cover these loads.

3.1. Definition of key performance indicators

Once the scope has been defined, the main indicators for evaluating and comparing different districts amongst them are selected. These indicators allow to assess the level of sustainability and cost-effectiveness of a given renovation project, or comparing different projects between them, as well as they are a useful instrument to help to check to what extent the project goals are achieved. Several references related to key performance indicators (KPIs) could be found in literature. It is interesting, as a way of example, the review on KPIs approach in building renovation, presented in 2016 by A. Kyliili et al. [24], where the authors classified the KPIs found in literature into different categories. After a detailed analysis of the different KPIs included in each category, three indicators have been considered to be most essential and accordingly used in this methodology: GHG emissions (CO₂ eq./m².year), PE use (kWh/m².year) and annualised total costs (€/m².year). Depending on the specific features of each case study, additional KPIs may be calculated, such as energy demand for the different uses (heating/cooling, DHW and electricity), the ratio between RES and total energy needs or the share of electricity supply from the grid in relation to the total electricity consumption of the given case study, to name but a few.

3.2. Energy demand side and energy supply side

The level of sustainability and cost-effectiveness of renovation projects is defined according to the evaluation of these KPIs for each scenario assessed. The assessment is carried out based on matching energy needs of the district with energy supply, as Fig. 1 illustrates. The figure also includes the three indicators selected as essential in this project (in green-lined boxes with


Fig. 1. Overview of principle of matching energy demand side and energy supply side.

green background), as well as other additional indicators that could be useful in the evaluation of different cases (in green-lined boxes with white background). It should be noted that, in districts, buildings usually have different initial situations regarding their thermal envelope, systems, etc. Furthermore, there is the challenge that renovation cycles of the envelopes in a district are usually not synchronised. It is recommended to take such differences into consideration when providing recommendations on how to renovate a given district, as some buildings may be in need of renovation where others may have just had a renovation.

Based on this approach, building clusters can be evaluated using dynamic simulations (they are recommended with an hourly time step), in order to evaluate or specific tools for evaluating the global performance of the whole systems, or considering the demand side on the one hand, and the supply side on the other hand.

The energy needs for heating and cooling of each building of the evaluated district are calculated based on building dimensions and thermal properties. DHW demand, as well as electricity demand, are considered according to standard profiles of the country where the assessed case study is located.

As far as supply side is concerned, both centralised and decentralised energy systems can be taken into consideration in this methodology. Specific interactions amongst the different technologies (e.g. those related to thermal storage) can be considered in

detail. Otherwise, simplified methods can be applied, considering general parameters, such as seasonal performance.

When characterising energy systems, four parameters are taken into account: cost (as a function of capacity), service lifetime, conversion efficiency and associated energy carrier. Several similarities with the assessment carried out for individual buildings in the Annex 56 project can be found in this methodology. However, it should be taken into consideration that, in order to extend the assessment to district heating systems, the cost structure of the district heating system should be considered by the different elements in it, in such a way that adding up the costs of all these elements (heating substations, pipes and distribution system or circulating pumps, amongst others) lead to the total costs of the heating system. These costs associated to the different elements include not only investment and maintenance costs (e.g. costs of distribution system include all the necessary work for putting the pipes into the ground) but also the energy losses and inefficiencies through these systems.

Finally, it should be mentioned that there are other parameters, which can play an important role when assessing the cost-effectiveness of district systems, such as the temperature gap between supply and return temperature, diameter of pipes, insulation level of distribution system, or similar specific parameters. However, there is not a specific focus on optimising these

parameters for creating optimal systems. The focus is rather on parameters which are directly associated with the optimal balance between EE and RES measures.

Energy use for the different uses is evaluated based on energy needs calculated following the norm EN ISO 52016-1:2017 [25]. Measured energy consumption of a given building or building cluster, if available, can be used to assess the plausibility of the calculated energy needs, but it will not be used as a basis for the assessments. Related GHG emissions and PE consumption are calculated based on these energy values by applying the corresponding emission factors and PE factors of each country.

The GHG emission and PE factors are considered to be annual factors and constant over time. The factors for electricity are supposed to refer to a future country mix based on renewable energy. In addition, in some specific scenarios, it is possible to take into consideration other types of electricity mixes more closely to the current electricity mix.

3.3. Economic analysis

As far as economic assessment is concerned, the previous experience of Annex 56 project is taken as a reference, and a life-cycle approach is chosen to evaluate costs of different renovation opportunities. It includes, in accordance with the guidelines to the EPBD [27]: i) initial investment cost or replacement costs; ii) energy costs (including existing energy and CO₂ taxes); and iii) maintenance and operational costs. These life cycle cost calculations are carried out dynamically. Therefore, it is proposed to use the annuity method for transforming any costs into annual costs, assuming the initial costs, the interest rate and the typical service lifespan for the renovation measures considered. In any case, alternatively, also the global cost method can be used. All these costs are categorised in Fig. 2.

The cost assessment is carried out from a private perspective, i.e. the district is assessed as a unit, with the aim of meeting the main target of the project (i.e. evaluating what type of combinations between EE and RES measures are most cost-effective while satisfying the boundary conditions). Nevertheless, it is considered to be appropriate for the project targets to investigate potential barriers for implementing the most cost-effective solutions satisfying the boundary conditions, due to the fact that several energy actors are usually involved.

As far as taxes are concerned, they are taken into account as given by the national framework conditions for each case study.

For CO₂ taxes, it is recommended to investigate various scenarios in a sensitivity analysis when new or a change of related taxes are under discussions in the respective countries.

Subsidies for energy related measures are excluded from the general assessment of costs, in order to make an assessment of the results that identifies optimal solutions regardless the effect of subsidies, which can vary along the time or even depending on the city where the district is located. When investigating the situation of a specific investor, they may nevertheless be included in a second alternative and specific assessment. External costs, benefits and co-benefits are not included. Other issues, such as the effect of the economy of scale are also considered in the methodology.

3.3.1. Energy related costs

Based on the previously defined hypotheses and considerations, the overview of the energy related money flows are presented in Fig. 3. This approach aims at defining in a more detailed way mainly the running costs previously mentioned in Fig. 2 and the links between energy and money flows in a given building cluster.

As depicted, the approach considers the two different types of supply that can be found in any building or building cluster: thermal energy (including heating, DHW and/or cooling) and electricity. Besides, electricity supply can be divided into two different subsystems: electricity supplied from the grid, and electricity produced in situ, by means of renewable energy.

When analysing the energy inputs in the “thermal system”, they can be renewable energy, fossil fuels and auxiliary energy. The output is the energy for the heating, cooling and/or DHW supplies. In both cases, this output comprises useful energy plus distribution losses. Thus, energy inputs equal energy outputs, including the energy losses due to the system inefficiencies. In a similar way, the running costs of a specific system will be those related to the energy purchase (€₁ and €₂) and costs related to maintenance, management and operation of the system (€₃). The sum of these costs directly affects the total operation costs for the system associated with the thermal subsystem (€₄).

Regarding electricity from the grid, only final electricity costs are taken into consideration (€₅). This cost is in fact the result of the different costs that this subsystem has to cover, such as the energy cost that have to be paid to generators or maintenance cost to the grid, which are out of the scope of this project.

Finally, in the other subsystem considered, “in situ electricity generation from RES”, only energy outputs are considered: energy used in the evaluated district, and energy exported to the grid. As

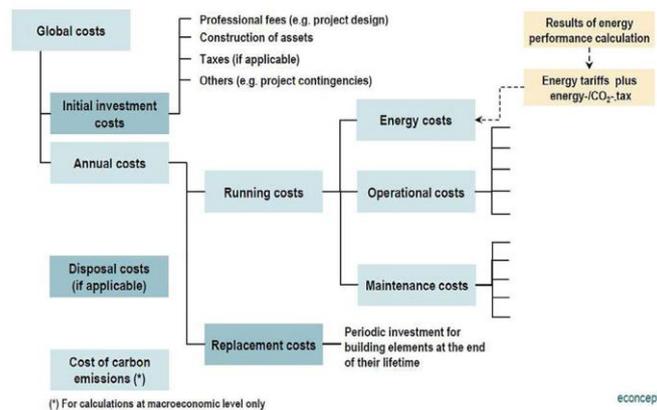


Fig. 2. Cost categorisation according to the framework methodology of EPBD recast [27] (figure from W. Ott et al. in [23]).

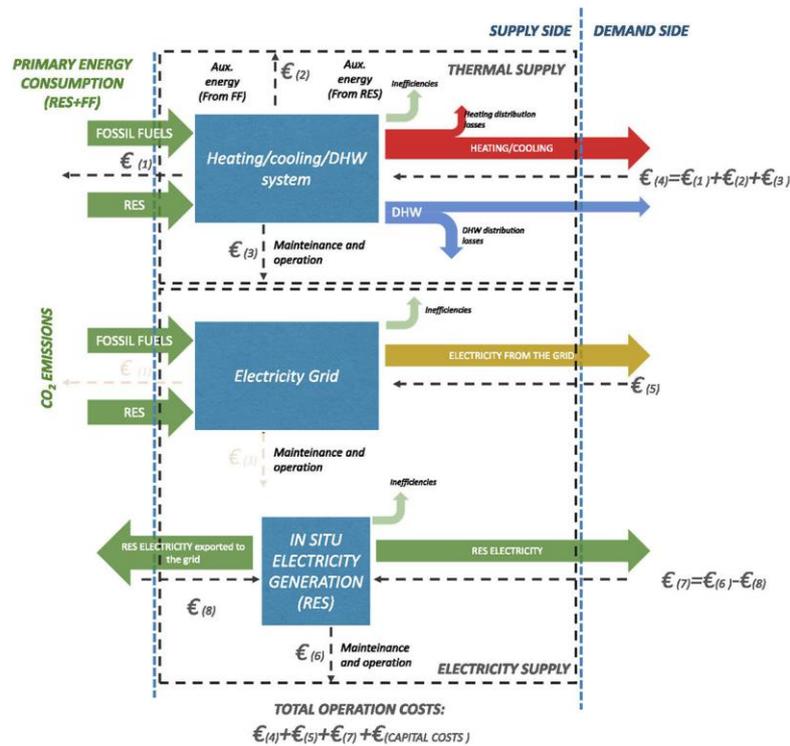


Fig. 3. Overview of money flows related to energy costs and maintenance/operational costs.

far as money flows are concerned, a cost of maintenance and operation (ϵ_6) and a benefit of electricity sold to the grid (ϵ_8) are considered. The benefit or the deficit of this subsystem for end users is the difference between these two costs (ϵ_7). It should be noted that this balance is highly dependent on regulations in each country: even though still in some cases the user has to pay to get rid of electricity production, the majority of the national regulations in European countries are being adapted to facilitate the exports of the electricity surpluses to the grid. However, the terms of these exports (mainly related to the costs) may significantly vary in each country. In addition, there are costs associated with the investments for these systems and resulting capital costs. Besides, it will require to perform hourly calculations if a detailed assessment of this issue is wanted.

Total energy costs and maintenance/operational costs for a related measure or set of related measures are the sum of ϵ_4 , ϵ_5 and ϵ_7 . In addition, there are costs associated with the amortization of the initial investments for these systems and resulting capital costs ($\epsilon_{\text{CAPITAL-COSTS}}$).

3.3.2. Energy prices

As far as energy prices are concerned, it is recommended in this methodology to take into account the expected future increases, in conformity with the report prepared for the European Union in 2016 on energy, transport and GHG emissions trends to 2050 [28]. For that reason, it is proposed to carry out the assessment with energy prices expected for 2030 to take into account future price increases. Further scenarios for energy prices may be

included as a part of sensitivity calculations. Regarding the interest rate, an indicative value of 3% is applied, unless more country-specific information is available.

3.4. System boundaries

The system boundary is set to correspond to “net delivered energy”. A graphic overview of it is depicted in Fig. 4. Energy carriers delivered to the building are added up, and for on-site generated electricity or heat exported from the building to the grid, a benefit is granted, which improves energy performance and lowers the GHG emissions of the buildings. However, it is proposed to assume that electricity in the grid is based on renewable energy, to take into account upcoming changes in the electricity mix, which then does not lead to any significant benefit other than potentially cost savings.

On-site generation of electricity is taken into account when it is produced from renewable sources. It is distinguished how much of electricity produced is consumed locally, and how much is exported to the grid. Revenues from exports of electricity or heat to the grid or an energy distribution system are taken into account (already considered in Fig. 3, as ϵ_8).

4. Assessment procedure

At the beginning of the assessment, the group of buildings to be investigated is defined. This can either be a generic district based

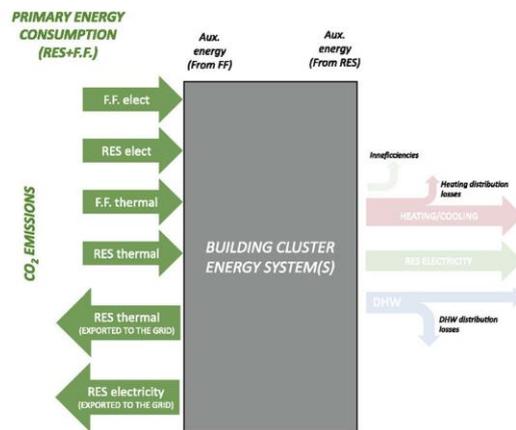


Fig. 4. Overview system boundaries and energy exchanges (RES – Renewable Energy Sources; FF – Fossil Fuels).

on reference buildings (as demonstrated later in this paper), or a specific district of a case study.

As far as thermal features are concerned, one way to estimate the U-values of buildings is by applying top-down approaches involving GIS data information such as a classification of each building according to its building period and latest renovation, and to apply then standard values for these buildings corresponding to their building period or the time of their latest renovation. Other possibilities could be remote-detected energy consumption or estimates made based on measured energy consumption, for example with data from the energy company, or even data provided by energy performance certificates.

4.1. Definition and assessment of reference case

For assessing cost and economic efficiency of energy renovation measures, the procedure developed in the Annex 56 at building scale is taken as a basis [23] and adapted to the district level. Before assessing energy renovation measures, a reference situation is defined to properly determine the effects of energy related renovation on energy use, greenhouse gas emissions and costs by comparing the impacts of the energy-related renovation scenarios with the impacts in the reference case. In Annex 56, to do that, a reference case was defined based on an intervention that comprises renovation measures that would have to be carried out anyway, just to restore the building's functionality (e.g. repainting the walls or repairing the roof to make it again water-proof). It is assumed that these anyway measures do not increase the energy performance of the building, but they involve costs. If necessary, hypothetical assumptions are made about the costs for such measures.

For heating and cooling systems, a replacement is also taken into account in the reference case. This is necessary to assess the costs of installing a new system in comparison with a correct reference scenario. In the reference case, the replacement is considered to be of the same type as the system installed before. Modern heating or cooling systems, even if based on fossil fuels, usually have slightly higher conversion efficiencies than previous systems of the same type. An increase in energy efficiency with respect to the system is usually taken into account also in the reference case. This reference case was designated as "anyway renovation" [23] and it is also applied in this methodology.

The methodology is open to evaluate additional reference scenarios without anyway measures (e.g. in a sensitivity analysis at the end), in order to assess the impact of taking or not into account such anyway measures. It might be argued that assessments without anyway measures for some buildings may be adequate in districts with large differences in renovation cycles of the buildings, as in such district it would be possible that energy renovation measures are carried out in connection with a district-wide renovation on those buildings for which the necessary anyway measures are still far in the future. This point may be taken into consideration in cases studies applying the methodology. However, it is assumed that differences in renovation cycles similarly affects anyway measures and energy efficiency measures in the districts, and it is adequate to take into account in the reference case anyway measures in order to specifically assess the impacts on the costs of energy-related parts of the measures.

4.2. Definition of building renovation scenarios

Once the KPIs of the reference case has been calculated, a set of building renovation measures is chosen, which are taken into consideration for inclusion in building renovation scenarios. Based on this set of renovation measures, either a limited number of combinations of renovation measures are identified as renovation packages for which the assessment is carried out, or an optimisation is carried out to identify the optimal solutions by choosing appropriate combinations through an optimisation engine. With the optimisation, the least cost combinations are sought satisfying the boundary conditions. For the investigated renovation packages, costs and effects of renovation measures are determined.

In this manner, for each building in the district, about 10 renovation packages are investigated, which have progressively higher ambition levels related to the resulting energy performance of the building envelope (by means of energy saving measures) and energy supply systems. A replacement of the heating system is assumed in all cases, whereas heat distribution system including the radiators is assumed to remain the same, even though they can be changed as well.

The renovation packages investigated will be chosen in a way to allow answering the research questions. In order to do this, it is important that varying levels of energy efficiency of the

building envelope are investigated, in combination with various types of heating systems. At the same time, it may be useful to align various renovation packages investigated with a variety of standards as occurring in a given country, to make the results more easily interpretable. Evaluating also combinations with at least one fossil fuel based system (centralised or decentralised according to the starting point of the district) and with both a centralised and a decentralised RES systems is recommended.

The size of the heating system is calculated by determining the required peak capacity to maintain the target indoor temperature despite heat losses during wintertime, and it is necessary to take into account that new heating systems can be downsized due to better insulation.

To identify the optimal solution, different approaches can be applied. Here it is proposed to consider as suitable solutions only combinations that result in an energy use covered fully by renewable energies; this includes electricity use, with a combination of electricity produced on-site and electricity imported from the grid. With this condition, the remaining GHG emissions are those associated with embodied emissions of the renovation measures and upstream emissions of the energy carriers. Among solutions that satisfy this condition, the optimal solution is then chosen by taking into account PE use as well as costs.

As mentioned in the previous section, the assessment is based on calculations and not on actually observed energy performance. In reality, it is sometimes observed that the energy efficiency performance levels do not reach the target values according to the calculations. Such observations are referred to as performance gap, which has been profusely studied and several references can be found in the literature, such as the comprehensive work recently published by E. Cuerda et al. in [29]. For carrying out the assessment, it is not necessary to take into account these effects, but it needs to be kept in mind, though, that this may potentially overestimate to a certain degree the cost-effectiveness of renovation measures.

4.3. Expected results and sensitivity analysis

For carrying out the assessments, the main KPIs introduced in section 3.1 are calculated. Thus, in order to assess the cost-effectiveness of different renovation packages, a comparison is made between the reference case and the renovation packages. Results are illustrated evaluating specific GHG emissions vs. costs and specific PE use vs. costs.

Moreover, it is recommended to evaluate the results by varying certain parameters to identify factors that strongly influence the results of the calculations. It may be particularly appropriate to take into account the parameters with higher uncertainties, such as the future development of energy cost, and various parameters characterising the district.

4.4. Relation between energy efficiency measures and implementation of renewable energy systems

Finally, there are several relationships between EE measures and RES measures, which affect significantly the project outcomes and, in consequence, they should be taken into consideration when the assessments are carried out.

The first is the relation between energy consumption and level of insulation of the building envelope. The better insulated the buildings are, the lower are their energy needs and the resulting energy consumption. This effect is stronger on reducing costs in case of fossil fuel based heating systems in comparison with renewable energy based heating systems, due to the lower operational energy costs of the latter.

The second is the importance of modelling the costs of the heating systems in an appropriate way as a function of the capacity of the heating system. This capacity is directly affected by the EE measures carried out, and this relationship is a key factor for assessing synergies or trade-offs between EE and RES measures. Due to economies of scale, the costs for a heating system are usually a logarithmic function of the installed capacity for large capacities. In order to facilitate the assessment, it is proposed to approximate the cost function with a piece-wise linear approximation based on a limited set of discrete capacity/costs relationships.

Finally, a remark related to heat pumps should be done. For them, there is an important synergy with EE measures on the building envelope, because the lower the energy need of a building is, the lower can be (to some extent) the temperature of the heat distribution system, which involves an increase of the efficiency of heat pumps. At the same time, in the case of high efficient buildings, the average outdoor temperature during which the heating system is in operation is lower than for less insulated buildings. As a consequence, the conversion efficiency of heat pumps tends to decrease in more energy efficient buildings. In addition, an increased energy performance of the buildings may have an impact on reducing heat losses in a district heating system. Therefore, it is necessary to take into account these issues when the conversion efficiencies of heat pumps are calculated, as a function of the heat need of the building cluster.

5. Demonstration of the proposed methodology: A Portuguese case study

In order to demonstrate the methodology, parametric calculations were carried on the Picoto neighbourhood in Braga region, located in the north of Portugal (see Fig. 5). Picoto is a social housing neighbourhood built in the 1990's. In Portugal, most social housing neighbourhoods arose after 1986 to meet the needs of adequate housing conditions of low-income households. In 1993, with the PER (Special Resettlement Program), social housing was significantly promoted, and cooperative housing and municipal



Fig. 5. Case study district. Aerial and general views of the neighbourhood.

Table 2
Specific heating, cooling and DHW needs assumed for the district (Total conditioned area: 1,767 m²).

	HEATING		COOLING (kWh/m ² .year)	DHW (kWh/m ² .year)
	(kWh/m ² .year)	(kWh/year)		
District load	164.31	290,335	7.33	26.16

housing emerged. Social housing buildings in Portugal represent about 2% of the total housing stock [30]. Municipalities, small municipal companies or the Institute of Housing and Urban Rehabilitation (IHRU, acronym of “Instituto da Habitação e da Reabilitação Urbana”) manage these neighbourhoods. In the majority of these neighbourhoods, affordability and reduced cost of construction were prioritised over quality and energy efficiency criteria. Consequently, indoor thermal comfort conditions are commonly not adequate and significant building pathologies are normally reported in this type of buildings.

5.1. Case study: Picoto social housing neighbourhood

The Picoto neighbourhood is located in Braga, location classified as Csb (Mediterranean warm/cool summer climates) in the Köppen and Geiger climate system [31]. The average annual temperature is 14.2 °C, with the hottest month being July (average of 20.3 °C) and January being the coldest with an average of 8.4 °C [32]. The Picoto social housing neighbourhood is representative of the social housing context in Portugal in terms of the low quality in construction, poor energy performance and inadequate thermal comfort conditions. The neighbourhood is composed of 50 single-family buildings with two floors, organised in seven different blocks with two predominant orientations – North/South and East/West – and with a total heated area of 1770 m². In terms of constructive characteristics, buildings in the neighbourhood all have similar building envelopes. There are two types of façades in each building. The façade type 1 (F1) is composed of two layers of hollow bricks (9 cm + 9 cm) and no insulation (U-value of 1.1 W/m²K). The bottom part of the buildings is constituted by the façade type 2 (F2), which is composed of concrete blocks with a U-value of 1.9 W/m²K. The sloping roof is constituted by asbestos cement undulating panels (U-Value of 3.8 W/m²K) and windows are single glazing with an aluminium frame with a U-value of 5.70 W/m² K. Individual electric heaters provide space heating and a gas boiler in each building supplies DHW, which are the most common solutions found in this social context. Three general views of the neighbourhood are depicted in Fig. 5. The chosen neighbourhood is not intended to represent the Portuguese building stock, which is marked by a significant heterogeneity. However, some of these characteristics for this group of buildings are very particular of the Portuguese context (where there is no practice of district heating), and it represents a suitable and challenging example for the application of the methodology.

Considering all aforementioned features, the energy demand of the reference case was calculated by means of dynamic simulations carried out with Energy Plus Software. It is recognised here that this type of calculation can be influenced by different sources of uncertainties, being one of the most important, the influence of user behaviour. For these energy calculations, a typical user behaviour and occupancy pattern were considered [33]. DHW load was estimated according to standard values stated in thermal regulations [34]. These values are summarised in Table 2.

5.2. Renovation scenarios

In order to study the effects of the renovation interventions on the neighbourhood and to test the research questions under study

Table 3
Main features of the evaluated packages.

Renovation packages for improving the buildings' envelope			
	Façade	Roof	Windows
P1	ETICS MW 80 mm (F1* and F2**)	Sandwich panel PUR 30 mm	PVC frame with double low emissivity glazing (U = 1.40 W/(m ² K)) with solar protection (g = 0.20)
P2	ETICS EPS 80 mm (F1* and F2**)	Sandwich Panel MW 30 mm	Aluminium frame with double glazing (U = 3.30 W/(m ² K) and g = 0.76)
P3	ETICS EPS 80 mm (F1* and F2**)	Sandwich panel PUR 30 mm	Aluminium frame with double glazing (U = 3.30 W/(m ² K) and g = 0.76)
P4	ETICS EPS 80 (F1*) ETICS EPS 120 (F2**)	Sandwich Panel MW 100 mm	Aluminium frame with double glazing (U = 3.30 W/(m ² K) and g = 0.76)
P5	ETICS MW 160 mm (F1*) ETICS MW 200 mm (F2**)	Sandwich Panel MW 100 mm	PVC frame with double low emissivity glazing (U = 1.40 W/(m ² K)) with solar protection (g = 0.20)

ETICS – External Thermal Insulation Composite System; MW – Mineral Wool; EPS – Expanded Polystyrene; PUR – Polyurethane foam; PVC – Polyvinyl chloride; *F1 – Façade Type 1; **F2 – Façade Type 2

in the project, five packages of building envelope measures (Table 3), as well as five system solutions were analysed (listed in Table 4). Simulations were performed by means of numerical simulations, using Energy Plus, a dynamic energy simulation software [35]. The simulated interventions are focused on the neighbourhood scale and, therefore, the packages of renovation measures were considered to be implemented in every building in the neighbourhood. The chosen renovation measures in the packages were aggregated after a preliminary individual assessment and represent common practices in Portugal and in this social housing context. In addition, when pertinent, the materials used in interventions on façades type 1 (F1) and type 2 (F2) were distinguished and are indicated in Table 3. Systems were designed using a centralised approach (i.e. one system for the whole neighbourhood), except for the conventional decentralised system solution (electric heater for heating, multi-split system for cooling and gas heater for DHW), which represents the individual default system normally considered in residential calculations [34] and was considered useful for comparison purposes. Centralised simulated systems were designed to meet 100% of the heating, cooling and DHW needs, with exception for the centralised biomass boiler with condensing technology (ESS 1), which does not consider cooling. This approach is considered possible in the Portuguese thermal regulation [34], whenever the overheating risk in summer is minimum, which is quite common in a substantial part of the Portuguese territory. There are three simulated energy supply systems based on heat pump technology (ESS 2, 3 and 4). Energy supply systems 3 and 4 also considered other sources of renewable energy supply. The heat pump + solar thermal (ESS3) considers that DHW energy needs are offset by the implementation of solar thermal panels. This option reflects a practice commonly adopted in Portugal. Motivated by current national thermal regulations and subsidies, by the availability of yearly solar radiation and affordable investment costs (1.45€/kWh.a), the use of solar thermal panels for offsetting DHW is a generalised approach for reducing

Table 4
System solutions.

Energy supply system (ESS)	Heating	Cooling	DHW	RES
1: Conventional Decentralised	Electric Heater h=1	Multi-split EER=3	Natural Gas Heater h=0.71	-
2: Centralised Heat Pump	Heat Pump COP/SCOP=4.06/3.77	Heat Pump EER/SEER=3.97/8.41	Heat Pump COP=4.10	-
3: Centralised Heat Pump +ST	Heat Pump COP/SCOP=4.06/3.77	Heat Pump EER/SEER=3.97/8.41	Heat Pump COP=4.10	ST (DHW)
4: Centralised Heat Pump +PV	Heat Pump COP/SCOP=4.06/3.77	Heat Pump EER/SEER=3.97/8.41	Heat Pump COP=4.10	PV (zero)
5: Centralised Biomass Boiler	Biomass Boiler h=1.07	(zero)	Biomass Boiler h=1.07	-

ST – Solar Thermal; PV – Photovoltaic system.

energy demand in residential buildings. For this approach, it would be required about 150 m² of available area. The heat pump + photovoltaic energy supply system (ESS4) assumes that the heating, cooling and DHW energy needs are supplied by crystalline silicon photovoltaic panels supported by battery storage. This approach assumes no restrictions on the availability of physical space for its implementation and intends to understand whether centralised PV systems can be a cost-effective alternative for the decarbonisation of the neighbourhood. The investment costs of PV panels are higher than in the case of solar thermal panels (2,07€/kWh.a) and, according to calculations, implementation of PV panels to offset the total primary energy needs would require, in this case, 670 m² of available area.

Regarding the economic assessment, the investment cost for the different renovation packages, as well as for the different energy supply systems (including grid and system implementation costs) were collected from market-based suppliers and from an established costs database widely used in the construction sector in Portugal [36]. Similarly, energy costs assumed in the analysis are 0.21 €/kWh for electricity, 0.06 €/kWh for natural gas [37]. Regarding the evolution of energy costs, and to reduce uncertainty, the analysis took into account results from established studies [38,39]. An interest rate of 5% was considered in this analysis. For comparison reasons, in the cost-effectiveness calculations, the reference case considers that an “anyway renovation” (i.e. an intervention for maintenance reasons, not improving the energy performance of the buildings) was performed.

5.3. Results from the parametric studies

The main results from parametric studies are presented in Fig. 6, in terms of emissions per year (kgCO₂eq/(m².year) and Non-Renewable Primary Energy (NRPE) (kWh/(m².year), per annu-

alised costs. Results show that the lowest annualised costs are achieved when the ESS 2 presented in Table 4 (centralised heat pump) is used. Specifically, annualised costs range in this case from 47.60 to 62.05 €/m², depending on the energy saving measures implemented on the envelope. When the NRPE and emissions are the focus, ESS 4 and ESS 5 (Centralised heat pump + PV and Centralised Biomass Boiler, respectively, as presented in Table 4) present the best performance achieving, in both cases, a zero emission district, regardless of the renovation package implemented on the envelope. Interestingly, these combinations achieve this performance with very different ratios of RES for the total energy needs. For the packages being combined with ESS4 this ratio ranges from 0.41 to 0.47, depending on the package of measures for improving the building envelope. However, when ESS5 is considered, every package presents a ratio of 1.

Regarding the renovation packages proposed in Table 3, it could be observed that P5 (ETICS MW 160 mm + ETICS MW 200 mm + Sandwich Panel MW 100 mm + PVC frame with double low emissivity glazing) is the package of renovation measures that consistently leads to higher reductions of NRPE (an average reduction of 375 kWh/m².year in all EESs), although at a considerable higher cost when compared to the rest of the packages. Despite this, there are differences in the hierarchy of measures depending on the energy supply system. For the EES1 (Conventional Decentralised), the ESS4 (Centralised Heat Pump + PV) and EES5 (Centralised Biomass Boiler), the cost optimal measure is P3 (ETICS EPS 80 mm + Sandwich Panel PUR 30 mm + double glazing aluminium windows), with annualised costs of 80.02 €/m², 67.14 €/m² and 57.30 €/m², respectively. However, for EES2 (Centralised Heat Pump) and ESS3 (Centralised Heat Pump + ST) is P2 (ETICS EPS 80 mm + Sandwich Panel MW 30 mm + double glazing aluminium windows), with annualised costs of 47.60 €/m² and 56.45 €/m².

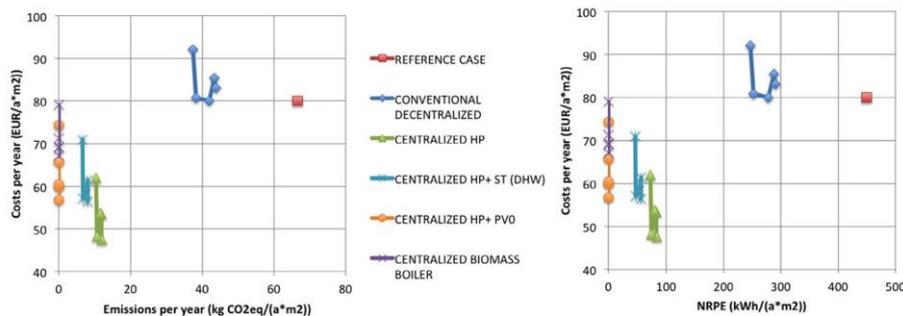


Fig. 6. Calculation results from Picoto neighbourhood simulations.

Results indicate that all the analysed centralised approaches are cost-effective. It is worth highlighting that besides the investment in systems and building envelope measures, the initial costs also include the cost of distribution (e.g. piping and associated civil works). In fact, the results from every renovation measure, when combined with the decentralised systems, present significantly higher global costs than the reference case. In opposition, the renovation package P2 (ETICS EPS 80 mm + Sandwich Panel MW 30 mm + double glazing aluminium windows) using a centralised Heat Pump is the cost-optimal intervention for the Picoto neighbourhood. Relevantly, it should also be highlighted that renovation measures simulated in combination with ESS4 (Centralised Heat Pump + Photovoltaic) and ESS5 (Centralised Biomass Boiler) can lead the Picoto neighbourhood to an energy and carbon emissions neutrality, while maintaining cost-effectiveness. This result is significant in the light of the initial costs being recurrently identified as one of the main barriers for implementation of the energy renovation interventions. Due to the size of the required systems and their high initial investment costs, this issue can represent a major hurdle. In these calculations, costs just for the centralised heat pump system represent a 50% increase in relation to the cost of all the necessary individual electric heaters considered in the decentralised approach. However, the consideration of a lifecycle perspective of the costs, allows for a deeper understanding of the lasting effects and the advantages potentially drawn from such an intervention.

In addition, both ESS4 and ESS5 (as well as Heat Pump Centralised + Solar Thermal) surpass the minimum requirements (both in terms of energy efficiency and renewable energy supply) for nZEB (nearly zero energy buildings), which will be mandatory for new buildings from the 1st of January of 2021. In Portugal, the minimum requirements that a residential building must meet in order to reach the nZEB level are to have primary energy needs 50% lower than a predefined reference level and renewable energy sources supply at least 50% of the annual primary energy needs [40].

Even though the research questions evaluated in the Annex 75 project should be addressed once considering different case studies evaluated across Europe and under different conditions, some insights related to the mentioned research questions could be identified looking at these results. This way, it is demonstrated how the proposed methodology could lead to find the answers when applying it in different case studies. In this case study, results suggest that cost-effective combinations between RES and EE measures are achievable using centralised approaches. In response to RQ1, it is relevant that the balance between the application of a centralised Heat Pump and Photovoltaic panels in combination with a package of renovation measures on the envelope (even the ones not necessarily addressing the full potential of energy savings from the building envelope, such as P3, for example) can lead the district to zero energy and carbon emissions neutrality within the limits of cost-effectiveness. On the other hand, as a response to RQ2, there is a greater difficulty, at this scale, in achieving balance in combinations regarding cost-effectiveness in a decentralised approach, like ESS1. In fact, results from this analysis show that only one package of renovation measures (P3) allows for cost-effectiveness in the decentralised approach to the neighbourhood. Moreover, and in relation to RQ3, results suggest that the efficiency of the energy supply system (which leads to significant operational energy savings during the building lifecycle) can be a key factor for the cost-effectiveness of the balance between energy efficiency measures and renewable energy supply. Additional factors arising from this analysis, with particular relevance to the Portuguese context, and influencing the balance of combinations are related to the pre-existing situation of the buildings in the neighbourhood (namely in terms of low energy performance) with the available area for implementation of RES and its cost/efficiency ratio, as well

as with the need for an additional cost in storage solutions. This is particularly important in the comparison between solar thermal and PV panels, for example. Solar thermal (if used for DHW) allows easy and inexpensive storage while the cost of storing electricity produced by PV panels is not negligible.

6. Conclusions and future works

Evaluating cost-effective strategies for reducing GHG emissions and energy use in buildings in cities at district level is a complex task. There are different research questions that can be investigated in this context. The methodology proposed by the Annex 75 project and presented in this paper provides a basis for investigating particularly the cost-effective balance between carrying out energy efficiency measures and deploying RES measures in the renovation of buildings at district level, and its application has been demonstrated in a real case study located in Portugal.

The application of this methodology for evaluating the case study has demonstrated the usefulness of the methodology for answering the research questions under study in this project. Moreover, even though more case studies should be evaluated to have answer comparably to other countries, the evaluated case study presents also interesting conclusions related to the mentioned research questions applied in the specific conditions in Portugal, as the case of Picoto neighbourhood. In particular, there are insights that can be drawn from this research that can address research questions 1, 2 and 3 (RQ1, RQ2 and RQ3). In relation to RQ1, importantly, Centralised Heat Pump + Photovoltaic and Centralised Biomass Boiler system solutions can lead the Picoto neighbourhood to an energy and carbon emissions neutrality, while maintaining cost-effectiveness. Regarding RQ2, the study highlights the advantage in terms of energy efficiency as well as costs of considering a centralised approach when addressing a group of building or neighbourhood such as the case study investigated here. In relation to RQ3, the study allowed for the indication of the efficiency of the energy supply system as one of the key factors for the cost-effectiveness of the balance between energy efficiency measures and renewable energy supply.

Although results are clearly related to the particular context of Portugal, the study is useful for demonstrating the applicability of the methodology. Moreover, results indicating that heating demand in this type of climate can be lower than in Northern Europe (where district heating for example, is widely disseminated) can be useful to understand the cost-effectiveness of centralised solutions and local heating network systems addressing neighbourhoods, in particular for southern countries in Europe as well. To comprehensively validate the methodology presented here, it is important to investigate other contextual settings and pre-existing situations, as this project plans to do in a next step. A deeper assessment of expected uncertainties, such as specificities in terms of the evolution of energy costs depending on the national context is also recommendable for future studies. This will also allow obtaining general trends and conclusions comparably to different countries and regions, regardless of their climate conditions and other specific conditions.

CRedit authorship contribution statement

Jon Terés-Zubiaga: Writing - original draft, Methodology, Conceptualization. **Roman Bolliger:** Conceptualization, Methodology, Writing - review & editing. **Manuela G. Almeida:** Project administration, Supervision, Writing - review & editing. **Ricardo Barbosa:** Software, Formal analysis. **Jorgen Rose:** Writing - review & editing. **Kirsten E. Thomsen:** Writing - review & editing. **Eduardo Montero:** Software. **Raúl Briones-Llorente:** Software.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

The work presented in this paper has been developed by the authors as a contribution to the IEA EBC Annex 75 project. The authors would like to acknowledge all the project participants and all national funding organizations.

The author Raúl Briones-Llorente wishes to acknowledge the *Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León* (Spain) and the Operational Programme European Social Fund for the funding of his doctoral scholarship.

References

- [1] European Commission, Energy, transport and environment indicators. Eurostat (2012).
- [2] IPCC, Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) 144 pp.
- [3] 2020 Climate and energy package—European Commission, https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en (2017).
- [4] 2030 Climate and energy framework – European Commission, https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en (2018).
- [5] European Commission, Directive 2012/27/EU on Energy Efficiency (2012).
- [6] European Commission, Directive 2010/31/EU on the Energy Performance of Buildings (2010).
- [7] O. Morck, M. Almeida, M. Ferreira, N. Brito, K.E. Thomsen, I. Østergaard, Shining Examples Analysed within the EBC Annex 56 Project, *Energy Procedia* 78 (2015) 2334–2339.
- [8] S. Pailho, J. Ketomäki, L. Kannari, T. Häkkinen, J. Shemeikka, A new procedure for assessing the energy-efficient refurbishment of buildings on district scale, *Sustainable Cities and Society*. 46 (2019) 101454.
- [9] O. Morck, M. Almeida, M. Ferreira, N. Brito, K.E. Thomsen, I. Østergaard, Shining examples analysed within the EBC Annex 56 project, *Energy Build.* 127 (2016) 991–998.
- [10] S. Domingo-Irigoyen, A. Sánchez-Ostiz, J.S. Miguel-Bellod, Cost-effective Renovation of a Multi-residential Building in Spain through the Application of the IEA Annex 56 Methodology, *Energy Procedia* 78 (2015) 2385–2390.
- [11] Å. Blomsterberg, E. Pedersen, Tenants Acceptance or Rejection of Major Energy Renovation of Block of Flats – IEA Annex 56, *Energy Procedia* 78 (2015) 2346–2351.
- [12] K.E. Thomsen, J. Rose, O. Morck, S.Ø. Jensen, I. Østergaard, Energy Consumption in an Old Residential Building Before and After Deep Energy Renovation, *Energy Procedia* 78 (2015) 2358–2365.
- [13] M. Almeida, M. Ferreira, Cost effective energy and carbon emissions optimization in building renovation (Annex 56), *Energy Build.* 152 (2017) 718–738.
- [14] F. Cappelletti, T.D. Mora, F. Peron, P. Romagnoni, P. Ruggeri, Building Renovation: Which Kind of Guidelines could be Proposed for Policy Makers and Professional Owners?, *Energy Procedia* 78 (2015) 2366–2371.
- [15] IEA EBC Annex 75, IEA EBC Annex 75 – Cost-effective Building Renovation at District Level Combining Energy Efficiency & Renewables.
- [16] J.S. Mira Conci, A District Approach to Building Renovation for the Integral Energy Redevelopment of Existing Residential Areas. 9 (5) (2017) 747–759.
- [17] European Commission, Commission Recommendation (EU) 2019/786 of 8 May 2019 on building renovation (2019).
- [18] European Commission, Directive (EU) 2018/844 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency (2018).
- [19] S.S. Castro, M.J. Suárez López, D.G. Menéndez, E.B. Marigorta, Decision matrix methodology for retrofitting techniques of existing buildings, *J. Cleaner Prod.* 240 (2019) 118153.
- [20] V. D'Alonzo, A. Novelli, R. Vaccaro, D. Vettorato, R. Albatini, C. Diamantini, P. Zambelli, A bottom-up spatially explicit methodology to estimate the space heating demand of the building stock at regional scale, *Energy Build.* 206 (2020) 109581.
- [21] S. Ferrari, F. Zagarella, P. Caputo, A. D'Amico, Results of a literature review on methods for estimating buildings energy demand at district level, *Energy*. 175 (2019) 1130–1137.
- [22] S. Ferrari, F. Zagarella, P. Caputo, M. Bonomolo, Assessment of tools for urban energy planning, *Energy*. 176 (2019) 544–551.
- [23] W. Ott, R. Bolliger, V. Ritter, S. Citherlet, S. Lasvaux, D. Favre, B. Périsset, M. Almeida, M. Ferreira, S. Ferrari, Methodology for Cost-Effective Energy and Carbon Emissions Optimization in Building Renovation (Annex 56). Report produced within the IEA's Energy in Buildings and Communities Programme, Annex 56, <http://www.iea-annex56.org/> [Last accessed 2019-06-06] (2017).
- [24] A. Kyliili, P.A. Fokaides, P.A. Lopez Jimenez, Key Performance Indicators (KPIs) approach in buildings renovation for the sustainability of the built environment: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 56 (2016) 906–915.
- [25] ISO 52016-1, Energy performance of buildings - Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads - Part 1: Calculation procedures (ISO 52016-1:2017) (2017).
- [26] European Commission, Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012, supplementing Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings, establishing a comparative methodology framework for calculating cost-optimal levels of minimum energy performance requirements for buildings and building elements (2012) L 81/18–L 81/36.
- [27] European Commission, EU Reference Scenario 2016. Energy, transport and GHG emissions trends to 2050 (2016).
- [28] E. Cuenda, O. Guerra-Santín, J.J. Sendra, F.J. Neila, Understanding the performance gap in energy retrofitting: Measured input data for adjusting building simulation models, *Energy Build.* 209 (2020) 109688.
- [29] Instituto Nacional de Estatística, Inquérito à Caracterização da Habitação Social relativo a 2015 (Retrieved December 12, 2018, from: https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_destaques&DESTAQUESdest_boui=250034590&DESTAQUESmodo=2&xlang=pt) (2015).
- [30] M. Kottek, J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, F. Rubel, World map of the Köppen-Geiger climate classification updated, *Meteorol. Z.* 15 (2006) 259–263.
- [31] Climate-Data.org, Climate-Data Braga. Available online: <https://pt.climate-data.org/europa/portugal/braga/braga-131/> (accessed on 26 March 2020) (2020).
- [32] R. Barbosa, R. Vicente, R. Santos, Climate change and thermal comfort in Southern Europe housing: A case study from Lisbon, *Build. Environ.* 92 (2015) 440–451.
- [33] República Portuguesa, Decreto-Lei n.º 118/2013—Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH). Diário da República 1.a série, N.º 2013 (159) (2013) 4988–5005.
- [34] DOE. Energy Plus v9.3.0. US Department of Energy. Available online: <http://energyplus.net> (accessed on 4 March 2020). (2020).
- [35] S.A. CYPE Ingenieros, Gerador de Preços. Portugal. Available online: <http://www.geradordeprecos.info/> (accessed on 4 March 2020). (2020).
- [36] Fundação Francisco Manuel dos Santos, PORDATA – Base de Dados Portugal Contemporâneo. Available online: <https://www.pordata.pt/> (Accessed on 4 March 2020) (2020).
- [37] International Energy Agency, World Energy Outlook 2019. (2019).
- [38] European Commission, EU Reference Scenario 2016 Energy, transport and GHG emissions Trends to 2050 Main results. (2016).
- [39] República Portuguesa. Portaria n.º 98/2019 – Metodologia de determinação da classe de desempenho energético. Diário da República n.º 65/2019, Série I de 2019-04-02.



UNIVERSIDAD DE BURGOS

Escuela Politécnica Superior