

**La Rehabilitación Energética de Viviendas Patrimoniales en la  
Descarbonización de los Centros Históricos de la Ciudad Mediterránea.  
Sevilla como caso de estudio**

**The Contribution of Energy Retrofit of Heritage Housing to the  
Decarbonization of Historic City Centres in the Mediterranean Region.  
Seville as a Case Study**

**Rosa Ana Caro Martínez**

TESIS DOCTORAL / PHD DISSERTATION Sevilla 2021

Director / Supervisor: Juan José Sendra Salas



**La Rehabilitación Energética de Viviendas Patrimoniales  
en la Descarbonización de los Centros Históricos de la  
Ciudad Mediterránea. Sevilla como Caso de Estudio.**

The Contribution of Energy Retrofit of Heritage Housing to the  
Decarbonisation of Historic City Centres in the Mediterranean  
Region. Seville as a Case Study.

**Rosa Ana Caro Martínez**

Sevilla, 2021

TESIS DOCTORAL / PHD DISSERTATION

Director / Supervisor

**Juan José Sendra Salas**



*La rehabilitación energética de viviendas patrimoniales en la descarbonización de los centros históricos de la ciudad mediterránea. Sevilla como caso de estudio / The contribution of energy retrofit of heritage housing to the decarbonisation of historic city centres in the Mediterranean region. Seville as a case study.* Rosa Ana Caro Martínez, Sevilla 2021.

Ilustración en portada: vista de los alrededores de la Iglesia de San Gil desde la azotea de una vivienda en la calle Sagunto de Sevilla (elaboración propia).

Tesis doctoral elaborada en el seno del grupo PAIDI TEP 130. Arquitectura, Patrimonio y Sostenibilidad: Acústica, Iluminación, Óptica y Energía, adscrito al Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC) de la Universidad de Sevilla.





*A mi familia*

## Agradecimientos

A mi director, Juan José Sendra Salas por confiar en mí. Su experta orientación, dedicación y amable disposición ha hecho posible que esta tesis doctoral avanzara con pasos seguros a lo largo de todo su desarrollo.

Al Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC) de la Universidad de Sevilla, por poner a disposición de este trabajo de investigación los recursos materiales necesarios.

A los profesores del Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, Dra. Jessica Fernández-Agüera, Dra. Rocío Escandón y Dr. Miguel Ángel Campano, por su cariñosa atención y ayuda en el manejo de equipamiento y herramientas.

A Anna Zoltowska por la diligencia y calidad de sus correcciones de textos en inglés.

A las personas que habitan las viviendas analizadas, Azahara, Julia, Paco, Leopoldo, Reyes, Luis y Sabela, por abrirme la intimidad de sus hogares, contestar a todas mis preguntas y con simpatía y cordialidad atenderme siempre que lo necesité. Sin vosotros esta tesis no hubiera nunca visto la luz.

A la Gerencia de Urbanismo del Ayuntamiento de Sevilla, especialmente a M<sup>a</sup> Victoria Segura Raya, por su amabilidad en la cesión de los datos de catalogación en formato *shape* que hicieron posible el análisis urbano acometido en esta tesis.

Al personal de la Consejería de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía implicado en la gestión y desarrollo del proyecto europeo VIOLET, que me ha permitido enriquecer el enfoque y aplicar los avances de mi investigación al ámbito profesional y por cuyo trabajo esta tesis opta a la Mención de Doctorado Industrial. Gracias a Esther Castillo, Marta Romero, Elena Morón y Juan León. Gracias, con un cariño especial, a María Dolores Gil Pérez, quién se comprometió con el nuevo reto de la eficiencia energética de los edificios patrimoniales con la sabiduría y decisión que le caracteriza. Sin vuestra implicación, entusiasmo y dedicación la pionera labor desarrollada en VIOLET no hubiera sido posible.

A Fernando, por su ánimo y apoyo incondicional. A Rita y a Violeta, gracias por su alegría y su paciencia. A mi hermana Elena, que desde la distancia me acompaña siempre. A mis padres, Charo y Alfredo, Patrimonio de mi memoria.





# Índice

Resumen .....	5
Abstract .....	9

## Bloque A

<b>Capítulo I. Introducción</b> .....	15
1.1. Estructura de la tesis .....	27
<b>Capítulo II. Hipótesis y objetivos</b> .....	31
2.1. Objetivo general .....	31
2.2. Objetivos específicos .....	31
<b>Capítulo III. Resumen y discusión de resultados</b> .....	33
III.1. Sección 1. Cartografía del patrimonio urbano histórico de Sevilla y metodología de selección de edificios representativos para análisis energéticos (artículo 1) .....	35
III.2. Sección 2. Comportamiento energético y condiciones ambientales interiores de viviendas en edificios patrimoniales de ciudades históricas de clima mediterráneo (artículos 2 y 3) .....	43
III.3. Sección 3. Introducción de energía renovable en los edificios patrimoniales de vivienda en clima mediterráneo (artículo 4) .....	85
III.4. Discusión general de resultados .....	111
<b>Capítulo IV. Conclusiones</b> .....	121
<b>Epílogo</b> .....	123
<b>Referencias</b> .....	125
<b>Lista de figuras</b> .....	139
<b>Lista de tablas</b> .....	148

## Bloque B

Artículo 1. Implementation of urban building energy modeling in historic districts. Seville as case-study .....	151
Artículo 2. Evaluation of indoor environment and energy performance of dwellings in heritage buildings. The case of hot summers in historic cities in Mediterranean Europe .....	167
Artículo 3. Are the dwellings of historic Mediterranean cities cold in winter? A field assessment on their indoor environment and energy performance .....	189
Artículo 4. The role of hybrid systems in the decarbonization of residential heritage buildings in Mediterranean climate. A case study in Seville, Spain .....	211

## Anexo

Relevancia científica de las revistas indexadas .....	233
Relevancia científica de las revistas indexadas .....	235



## Resumen

En el escenario de cambio climático, uno de los más ambiciosos y complejos retos consiste en minimizar el impacto que el metabolismo de nuestras ciudades ejerce sobre el medioambiente. A pesar de su potencial contribución a la reducción de emisiones, la rehabilitación energética de los edificios históricos es obstaculizada porque se percibe como un riesgo cultural, ya que las exigencias de eficiencia energética y los principios de conservación podrían entrar en conflicto. De hecho, la directriz europea en la materia los exime del cumplimiento de estas exigencias, que son obligatorias para el resto de edificios, en flagrante contradicción con la “Carta de las Ciudades Europeas hacia Sostenibilidad” o “Carta de Aalborg” de 1994, cuyos objetivos se recogen en las recomendaciones internacionales sobre conservación del patrimonio.

El 23% de los edificios de vivienda europeos fue construido antes de 1945. La gran mayoría están legalmente protegidos o afectados por reglas de conservación vigentes en los conjuntos históricos donde se encuentran. Su exclusión de los planes de rehabilitación energética no está exenta de riesgos medioambientales y socioeconómicos. Además de comprometer el alcance del ambicioso objetivo de reducción de emisiones, contribuye al empeoramiento de la calidad del aire de los barrios históricos, quedando su población condenada al despilfarro energético o a vivir en deficientes condiciones ambientales interiores, con el consiguiente impacto sobre su salud. Esto desalentará su ocupación y acelerarán los desfavorables procesos de mercantilización ya en curso. Por otro lado, incluir los numerosos edificios históricos de vivienda en los planes de descarbonización urbana, garantizando la protección de sus valores, es una tarea de tal complejidad que convierte a estos proyectos de rehabilitación en desafíos científico-técnicos. La heterogeneidad y características constructivas de las viviendas históricas aconseja no aplicar fórmulas estandarizadas de rehabilitación energética, ya que pueden provocar efectos adversos y pérdidas patrimoniales que ya han empezado a registrarse en la literatura científica. Además, la incorporación de energía renovable puede, en muchas ciudades, desfigurar el paisaje urbano histórico, que desde el “Memorándum de Viena” de 2005 forma parte de los elementos urbanos protegidos y, en algunos casos, entrar en conflicto con las normas de protección arqueológica.



A pesar de que desde 2018 la directriz europea en la materia reconoce la necesidad de investigación y ensayo de nuevas soluciones, los estudios de eficiencia energética de edificios residenciales históricos en regiones de clima mediterráneo son prácticamente inexistentes.

El objetivo de esta tesis es analizar el comportamiento energético y calidad de aire interior de viviendas patrimoniales localizadas en zonas de clima mediterráneo, para diagnosticar su potencial de mejora y proponer soluciones que aumenten su eficiencia, aminoren sus emisiones de CO<sub>2</sub> y mejoren sus condiciones ambientales interiores. Ello contribuirá a generar el conocimiento necesario para la obtención de indicadores específicos que permitan integrarlas en los planes urbanos de rehabilitación energética diseñados para las condiciones de climáticas y culturales de las áreas históricas mediterráneas.

Para ello, se ha tomado el Conjunto Histórico de Sevilla, declarado “Bien de Interés Cultural” y uno de los más extensos de Europa, como territorio de experimentación. Cuatro edificios de vivienda catalogados, representativos de las tipologías históricas y grados de protección más abundantes y localizados en su barrio más densamente poblado, San Gil, han sido analizados y diagnosticados, proponiéndose soluciones para su rehabilitación energética. La metodología utilizada ha incluido simulación energética dinámica, apoyada en la toma experimental de datos sobre sus envolventes, patrones de uso de sus residentes y evolución horaria de los parámetros ambientales exteriores e interiores más relevantes. Los resultados muestran que, respetando las reglas de la protección patrimonial, el margen de mejora es considerable y no debe ser subestimado. Además, la necesaria introducción de energía renovable puede realizarse mediante sistemas híbridos, no exclusivamente basados en tecnologías de captación solar con alto impacto paisajístico, si no en maduras tecnologías de intercambio de calor.



## Abstract

In the climate change scenario, one of the most ambitious and complex challenges is that of minimising the impact of our cities' metabolism on the environment. Despite their worthwhile potential for reducing CO<sub>2</sub> emissions, the energy retrofit of historic buildings is hindered because it is still perceived as a cultural risk since it might interfere with the conservation principles regulating their treatment. In fact, the European Directive on the subject exempts them from complying with energy efficiency requirements, in flagrant contradiction with the "Charter of European Cities towards Sustainability" or "Aalborg Charter", whose objectives are included in the international recommendations on heritage conservation.

23% (on average 27 EU Member States) of the total European housing stock predates 1945. These residential buildings are usually considered "historic" in terms of legal protection or are located in conservation areas where special rules apply. Since they constitute the biggest proportion of the historic building stock of European cities and define their identity, the potential environmental risks and the unexpected socio-economic consequences deriving from the legal exemption mentioned earlier should be thoughtfully considered. Their exclusion from the energy retrofit plans may prevent the ambitious target of CO<sub>2</sub> emissions reduction set in the European strategy from being reached and contributes to worsening air quality in historic districts. Their population could be condemned to energy waste or obsolescence in terms of thermal comfort, in turn increasing health risks. In this scenario, high energy costs and low levels of wellbeing would discourage the use and occupation of historic neighbourhoods, which would further accelerate the ongoing commodification process, now globally recognized as a cause of unsustainable metropolitan unevenness. On the other hand, including the large historic housing stocks on the EU energy efficiency targets, while ensuring the conservation of its protected values, is a complex task that may make energy retrofit projects extremely challenging. Their heterogeneous geometry, constructive systems, materials, and conservation strategies advise against applying standardised energy efficiency formulas, as they may cause heritage losses and adverse effects that have yet started to be reported in the scientific literature. In addition, the incorporation of renewable energy may disfigure the historic urban landscape, which since the "Vienna Memorandum" is part of the protected urban elements and, in some cases, may conflict with archaeological protection rules.





Despite the fact that since 2018 the European directive on energy efficiency recognises the need for research and testing of new solutions, energy efficiency studies of historic residential buildings in Mediterranean climate regions are practically non-existent.

The objective of this thesis is to analyse the energy performance and indoor air quality of listed residential buildings located in Mediterranean climate zones, in order to diagnose their potential for improvement and propose solutions to increase their efficiency, reduce their CO<sub>2</sub> emissions and improve their indoor environmental conditions. This will facilitate the generation of specific indicators that will allow the integration of this type of buildings into urban energy retrofitting plans designed for the climatic and cultural conditions of historic Mediterranean areas. For this purpose, the Conservation Area of Seville, one of the most extensive in Europe and declared an "Asset of Cultural Interest", has been taken as a case study. Four residential listed buildings, representative of the most abundant historical typologies and protection grades, and located in its most densely populated neighbourhood, San Gil, have been analysed and diagnosed, proposing solutions for their energy retrofit.

The methodology used for this research included dynamic energy simulation supported by experimental data collection on the building envelope characteristics, users' patterns analysis and the hourly evolution of the most relevant outdoor and indoor environmental parameters. Results show that, while respecting the rules of heritage protection, the room for improvement is considerable and should not be underestimated. Furthermore, the necessary introduction of renewable energy can be achieved through hybrid systems, not exclusively based on solar collectors' technologies with high visual impact, but on mature heat exchange technologies.



# **Bloque A**



## Capítulo I. Introducción

Desde principios de los años 90 del pasado siglo, el diseño de las políticas energéticas de la Unión Europea se ha venido sustentando en la seguridad del abastecimiento energético y en la mitigación de los efectos del cambio climático, revelados en el primer informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) de 1990 y en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), firmada en la Cumbre de Río en 1992. En los documentos normativos, los legisladores han venido confiando en la eficiencia energética y la implantación de fuentes de energía renovable para reducir tanto las emisiones de CO<sub>2</sub>, grandes responsables del cambio climático, como las importaciones de energía de origen fósil, garantizando la competitividad económica de los usuarios finales.

El término *descarbonización*, la eliminación o reducción del contenido de carbono de un compuesto químico, es de uso frecuente en la industria metalúrgica, sobre todo del acero (en inglés *decarburization* o más frecuentemente *decarbonisation*). Comenzó a emplearse en los campos de la economía y las ciencias ambientales hace, aproximadamente, dos décadas [1] para designar todas aquellas medidas encaminadas a la eliminación de los compuestos de origen fósil en la generación de la energía, con el fin de facilitar el restablecimiento del equilibrio del ciclo del carbono en la atmósfera terrestre, evitando su calentamiento y las consiguientes modificaciones en los patrones climáticos. En el ámbito urbano, se refiere a las estrategias de eliminación de combustibles de origen fósil en el transporte, así como a la rehabilitación energética de los edificios y al establecimiento de sistemas distribuidos de autoproducción de energía a partir de fuentes renovables. Actualmente existe consenso general en que los objetivos de descarbonización que pretenden revertir el proceso de calentamiento global son técnica y económicamente viables para Europa, pero deben alcanzarse al ritmo adecuado, adaptándose a las innovaciones y al comportamiento humano, que no siguen patrones lineales [2].

En la Unión Europea (UE) los edificios son responsables del 36% de las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas durante su construcción, utilización, renovación y demolición [3] y consumen el 40% de la energía final total [4]. Teniendo en cuenta que las importaciones de energía cubren todavía más de la mitad de las necesidades energéticas de los países de la UE (el 58.2 % en 2020) y que la energía importada es mayoritariamente de origen fósil [5], el sector de la edificación presenta un enorme potencial de descarbonización. Es por ello que los niveles de eficiencia energética exigidos a los edificios europeos, tanto los de nueva construcción como los que se rehabiliten, han ido endureciéndose progresivamente desde la primera directiva de 1993 [6] hasta la más reciente de 2018 [3]. Esta exigencia creciente está en consonancia con las cada vez más ambiciosas estrategias climáticas europeas a largo plazo, la última de las cuales pretende alcanzar una nueva economía de neutralidad climática en 2050 [7]. Puesto que los edificios en Europa suelen tener un periodo muy largo de vida, la construcción de los nuevos supone solamente el 1% del conjunto total por año [8]. Este hecho hace que el éxito o el fracaso de las estrategias descarbonizadoras europeas dependa, en mayor medida de los edificios existentes que del escaso número de edificios altamente eficientes construidos en los últimos años,

siguiendo la directiva UE 2010/31 [4]. De hecho, desde 2012, tras la entrada en vigor de la directiva UE 2012/27 [9], cada Estado miembro está obligado a establecer una estrategia a largo plazo para transformar su parque de edificios existentes en uno de alta eficiencia energética y descarbonizado para 2050, que debe revisarse cada tres años. En nuestro país se dio respuesta a esta obligación con la “Estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España” (ERESEE 2020) [10], de reciente publicación y que ha sustituido a las anteriores de 2014 y 2017.

Sin embargo, a pesar de que la rehabilitación energética de edificios es una apuesta decidida de la UE, como lo muestra el hecho de que recientemente se haya destinado a ello una parte importante de los fondos del Plan de Recuperación [11], en virtud del artículo 5 de la directiva UE 2012/27 [9], aquellos “edificios protegidos oficialmente por ser parte de un entorno declarado o en razón de su particular valor arquitectónico o histórico” quedan exentos del cumplimiento de los requerimientos de eficiencia energética impuestos a los demás. Esta dispensa es debida a que los legisladores europeos entendieron que el cumplimiento de determinados requisitos mínimos de eficiencia energética puede alterar de manera inaceptable el carácter y aspecto de los edificios históricos. Siguiendo esta directiva, la legislación española permite que los edificios protegidos oficialmente, cuando son rehabilitados, queden eximidos del cumplimiento del Código Técnico de la Edificación en materia de energía [12], [13], [14].

Si bien es cierto que, en España, los edificios catalogados parecen representar un pequeño porcentaje del conjunto total (actualmente no existen datos de calidad a nivel nacional o regional sobre este particular), cuando aumentamos la escala del análisis desde la territorial estatal hasta la municipal, donde sí existen datos fiables, aumenta su proporción en el conjunto observado. Así, en los centros históricos de nuestros pueblos y ciudades, como en los del resto de Europa, la mayor parte de los edificios cuentan con algún tipo de protección que les exime de ser rehabilitados energéticamente. Es el caso de Sevilla, ciudad escogida como caso de estudio para esta tesis doctoral, en cuyo Conjunto Histórico declarado el 67% de los edificios existentes están catalogados [15], [16]. Si asumimos, siguiendo el consenso alcanzado en el contexto del proyecto europeo EFFESUS [17], que cualquier edificio construido con anterioridad a 1945 puede ser considerado *histórico* [18], y que la gran mayoría son edificios de viviendas que, o bien gozan de algún tipo de protección legal, o están incluidos en áreas históricas protegidas donde se aplican reglas específicas de conservación paisajística y arqueológica, el impacto de su exclusión de los planes de rehabilitación energética es significativo. Los edificios de vivienda construidos antes de 1945 constituyen el 23% del total existente en los 27 países integrados en la UE [18]. En España los inmuebles residenciales construidos antes de 1940 son el 11% del total [10]. Puesto que estos edificios se concentran mayoritariamente en barrios o conjuntos históricos, son la clave del éxito o el fracaso de su conservación sostenible.

Excluir estos edificios de los planes de rehabilitación energética entraña el riesgo de que los objetivos globales de reducción de emisiones en Europa no se alcancen, penalizando la salud medioambiental de barrios históricos completos, la mayoría de cuyas viviendas quedarían

condenadas al despilfarro energético o a la obsolescencia en términos de confort. Los altos costes energéticos y los bajos niveles de bienestar predecibles para ellas desalentarían su uso y ocupación, lo que contribuiría a acelerar los procesos de mercantilización ya en curso, aspecto globalmente reconocido como causante de graves desequilibrios metropolitanos. La población residente en los centros históricos quedaría así en una situación de mayor vulnerabilidad que el resto a los riesgos derivados de la obsolescencia energética, con gran impacto sobre la salud, agravados además por el cambio climático. Por el contrario, rehabilitarlas energéticamente bajo iguales o similares exigencias de eficiencia a que son obligados el resto, mediante programas específicamente diseñados, reduciría sus emisiones contaminantes a la atmósfera y mejoraría sus condiciones ambientales interiores. Este escenario, además de ser socialmente justo, contribuiría al cumplimiento de los ambiciosos objetivos descarbonizadores europeos y ayudaría a la preservación sostenible de sus áreas históricas.

No obstante, descarbonizar los edificios patrimoniales de vivienda, haciéndolos más eficientes, menos contaminantes y más saludables, al tiempo que se garantiza la protección de sus valores y los del paisaje urbano en que se insertan, es una tarea de mayor complejidad que la correspondiente a edificios no patrimoniales; constituye un verdadero desafío cultural, legislativo y científico-tecnológico.

El **desafío cultural** está relacionado con la puesta en crisis de muchas de las asunciones y planteamientos con los que las políticas de conservación del patrimonio histórico europeo se han venido elaborando desde sus inicios, hace ya unos 200 años [19], y que son de aceptación generalizada. Determinados cambios en el paisaje urbano histórico, derivados de su descarbonización, podrían conducir al menoscabo de su autenticidad, cuya salvaguarda fue promulgada por UNESCO en el Memorándum de Viena de 2005 [20], donde se incluyó el *roofscape* urbano como parte del patrimonio histórico a proteger. Puesto que el gusto, el valor y las preferencias referentes al paisaje cambian con el tiempo en función del discurso cultural que los alimenta, fenómeno que Bourdieu denominó *producción social del gusto* [21], los inevitables procesos de descarbonización urbana, ya en curso, podrían alimentar ciertas transformaciones culturales sobre las políticas de conservación de los centros históricos. Del mismo modo que los nuevos paisajes agrícolas o ganaderos *climáticamente neutrales* generan polémica entre la población, aun revelando modelos de producción más sostenibles [22], también los nuevos paisajes urbanos históricos descarbonizados podrían necesitar, para ser valorados, que la *frugalidad energética* se convirtiera en el argumento convincente que los sostenga [23], [24].

El **desafío legislativo** deriva del anterior. Se trata del control de la *contaminación visual y perceptiva* contemplado en el artículo 19 de la vigente Ley 14/2007 de Patrimonio Histórico de Andalucía [25]. Esta ley obliga a los municipios con bienes patrimoniales inscritos en el Catálogo General del Patrimonio Histórico Andaluz a incluir en su planificación urbanística medidas de control sobre "las instalaciones permanentes o temporales cuya altura, volumen o distancia puedan perturbar la percepción del bien" y, en concreto, "las instalaciones relacionadas con el suministro, la generación y el consumo de energía". En el nuevo borrador del anteproyecto de

ley que sustituirá en breve a la ley vigente [26], se incluye, además, en su artículo 34 bis, la obligación de incorporar la *Evaluación de Impacto Patrimonial* a los proyectos que afecten a edificios o elementos situados en Andalucía inscritos en la Lista del Patrimonio Mundial o en su zona de amortiguamiento. Los sistemas de producción de energía renovable, sobre todo los basados en colectores solares, y también otros equipos térmicos de alta eficiencia, fundamentales para la descarbonización de los edificios, ocupan grandes volúmenes y pueden producir la contaminación visual en los entornos urbanos históricos que la legislación trata de evitar. Además, la implantación de algunos sistemas geotérmicos puede verse impedida por normativa de preservación de restos arqueológicos.

El **reto científico-tecnológico** está relacionado con la inherente complejidad que presenta la rehabilitación energética de los edificios históricos bajo la premisa del respeto a las reglas de la protección patrimonial. La transformación de un edificio patrimonial en uno de *consumo energético casi nulo*, de alta eficiencia y cuya demanda está cubierta en gran medida por fuentes renovables, es una tarea con múltiples objetivos de distinta naturaleza, no únicamente medioambientales, que pueden entrar en conflicto en muchas ocasiones y que obliga, en la práctica, a buscar soluciones de compromiso. Estos objetivos pueden clasificarse en cinco grandes grupos:

1. Conservación.

Preservación de la integridad física de los elementos constructivos de los edificios históricos, de los restos arqueológicos presentes en el subsuelo de las áreas históricas y de la autenticidad del paisaje urbano histórico.

2. Medioambiente.

Reducción del consumo de energía primaria de origen fósil y de las emisiones contaminantes a la atmósfera.

3. Salud.

Bienestar térmico y calidad de aire interior.

4. Eficiencia energética.

Reducción de la demanda energética y del consumo de energía final.

5. Economía.

Reducir las importaciones de energía de origen fósil en Europa y el importe de facturación energética del consumidor final mediante soluciones económicamente viables.

La consecución de objetivos tan diversos afecta a las varias decenas de factores implicados en el comportamiento energético de un edificio, que además interactúan entre sí de una manera dinámica. Entre estos factores se incluye comportamiento humano, que es especialmente relevante en las viviendas. Debido a esta complejidad, la rehabilitación energética de los edificios históricos, que se ha venido realizando por el procedimiento práctico de *prueba y error*, sin el suficiente apoyo de metodologías científicas, no está exenta de posibles efectos adversos sobre los edificios relacionados con un uno o con varios de los aspectos arriba descritos.



La aplicación de fórmulas estandarizadas de eficiencia energética a las viviendas patrimoniales puede provocar efectos adversos en su integridad constructiva, relacionados con la modificación de sus condiciones higrotérmicas, y sobre la calidad del ambiente interior. Este aspecto viene siendo registrado en la literatura científica [27], [28], [29], [30], [31], [32] que recoge también la desconfianza o rechazo que este tipo de intervención puede suscitar entre los usuarios [33]. Por ejemplo, las soluciones tendentes a aumentar la estanqueidad al aire de la envolvente, cuando no van acompañadas de nuevos sistemas de ventilación mecánica o híbrida, pueden producir empeoramiento de la calidad de aire interior y aumento del riesgo de condensaciones [34], [35], [36]. La colocación de aislamiento térmico por la cara interior de los muros históricos crea una mayor resistencia al paso de vapor de agua, lo que dificulta su secado y aumenta el riesgo de condensaciones en los elementos constructivos [35], [36], además de producir sobrecalentamiento del ambiente interior en verano [37], [38], [39], [40]. Muchos de estos efectos pueden acelerar el envejecimiento de fábricas y estructuras antiguas porque producen pérdida de consistencia de morteros en muros de piedra o ladrillo, pérdida de propiedades en elementos de madera, etc. Todos estos efectos desfavorables se verán agravados, además, por el impacto del cambio climático [41], [32], [42]. Tampoco las viviendas patrimoniales están exentas del conocido efecto *Rebound* o aumento del consumo tras la rehabilitación energética [43]. La evaluación de su rendimiento energético presenta, además, dificultades específicas [44] relacionadas con la heterogeneidad de su geometría, de sus sistemas constructivos, materiales y estado de conservación, que se adaptan peor a los valores y procedimientos estandarizados basados en materiales y sistemas más recientes de muy diferentes propiedades higrotérmicas.

A escala urbana, excluir los edificios patrimoniales de los planes de rehabilitación energética, subestimando su potencial de ahorro energético y de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, constituye un flagrante conflicto con el modelo de ciudad propuesto por la “Carta de Aalborg” de 1994 [45] y la “Carta de Leipzig” de 2007 [46], alineadas con las actuales recomendaciones internacionales sobre sostenibilidad urbana, basadas en los Acuerdos de París 2015 [47] y Madrid 2019 [48] y en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas [49]. ¡Los conjuntos históricos quedan eximidos de cumplir las reglas sobre eficiencia energética, pero la ciudad como totalidad debe acomodarse a los principios de Aalborg! Pero, además, la exclusión mencionada entra también en contradicción con las recomendaciones internacionales sobre conservación de patrimonio, que han ido progresivamente incorporando los objetivos de sostenibilidad urbana. En este sentido, merecen especial atención dos documentos de 2011: la *Recomendación sobre el Paisaje Urbano Histórico* de UNESCO (ratificado por ICOMOS en 2015) [50]; y los *Principios de la Valeta* de ICOMOS [51]. En el primero se declara: “La preocupación por el medio ambiente, sobre todo por el consumo de agua y energía, exige nuevos planteamientos y modelos de vida urbana basados en políticas y prácticas que tengan muy presentes las cuestiones ecológicas para mejorar la sostenibilidad y la calidad de vida de las ciudades. Pero muchas de estas iniciativas también deben dar cabida al patrimonio natural y cultural como recurso útil para un desarrollo sostenible”. El segundo documento, a propósito del ahorro energético, proclama: “Toda intervención en las poblaciones y áreas urbanas históricas debe orientarse a la mejora de

la eficiencia energética y a la reducción de los elementos contaminantes, siempre respetando el patrimonio histórico. Debe reforzarse la utilización de fuentes de energía renovables”.

Para superar estas dificultades se necesita investigación, que hasta hace bien poco se ha visto lastrada por la asunción, no suficientemente comprobada, de que los edificios patrimoniales se comportan energéticamente mejor y son más confortables que los edificios *modernos*, y de que la rehabilitación energética requiere normalmente medidas intrusivas que implican la pérdida de valor patrimonial. En la última década, gran cantidad de investigadores y responsables de políticas urbanas, aceptando el triple desafío y siguiendo las directrices marcadas por UNESCO basadas en la sostenibilidad de las políticas de conservación del patrimonio, comenzaron a ponderar los posibles riesgos y consecuencias socio-económicas desfavorables derivados del hecho de eximir a los edificios históricos de los planes urbanos de rehabilitación energética. En la actualidad es ya de aceptación generalizada la necesidad de una nueva aproximación al problema [28], donde la mejora de la eficiencia energética de estos edificios, apoyada por programas específicos, se enfoque con metodologías científicas rigurosas y no sea percibida como una nueva carga en el proceso de rehabilitación, sino más bien como una nueva herramienta de protección [52]. Este hecho es puesto de manifiesto por tres hechos recientes:

1. La Directiva Europea UE 2018/844 [3] (que modifica las anteriores UE 2010/31/UE y 2012/27/UE) relativa a la eficiencia energética de los edificios, en el punto 18 de las consideraciones preliminares, declara: “Es preciso fomentar la investigación y el ensayo de nuevas soluciones capaces de mejorar el nivel de eficiencia energética de los edificios y sitios de interés histórico, garantizando al mismo tiempo la protección y la conservación del patrimonio cultural”.
2. ICOMOS incluyó recientemente entre su lista de comités científicos asesores un nuevo Comité Internacional sobre Energía y Sostenibilidad (ISCES) [53].
3. En mayo del 2018, el Comité Técnico sobre Conservación de Patrimonio Cultural del Comité Europeo de Estandarización (CEN/TC346) publicó la primera “Guía para la mejora de la eficiencia energética de los edificios históricos” (UNE-EN 16883) [54].

Desde 2010 hasta la actualidad el flujo de proyectos europeos y la aceleración de la producción científica en la materia ha ido aumentando progresivamente. En lo referente a los primeros, los más relevantes son:

***New4Old. New energy for old buildings*** (2010) [55]. Se trata de un proyecto de escala reducida centrado en la introducción de energía renovable en edificios patrimoniales y que se concretó en la reforma de un edificio histórico en Bruselas denominado *Renewable Energy House*, hoy en día usado como edificio de oficinas en alquiler. Se consiguió reducir el 50% de su demanda de climatización y cubrir la totalidad de la demanda con energía renovable geotérmica y fotovoltaica.

***RENERPATH*** (2011-2013) [56]. Es también un proyecto de escala reducida con socios españoles y portugueses. Se centró en las técnicas de análisis no intrusivas para estudiar el comportamiento energético de edificios históricos. Los casos de estudio fueron la Catedral de

Ciudad Rodrigo (uso discontinuo), en Salamanca, y el Palacio Episcopal de Pinhel (uso continuado), en Portugal.

**3encult** (2010-2014) [57]. Es un proyecto de mayor escala que los anteriores donde participaron 21 socios entre organizaciones públicas y privadas e intervinieron 6 países (Alemania, Austria, Dinamarca, España, Italia y Suiza). Se centró en la reducción de la demanda energética de edificios históricos, incluyendo casos de edificios del Movimiento Moderno, como la Escuela de Ingeniería Industrial de Béjar, en Salamanca. Trabajó fundamentalmente en la mejora de envolvente e instalaciones a escala de edificio y, en el caso austríaco, en la introducción de energía renovable. Dio lugar a extensa documentación y una guía de apoyo para propietarios y profesionales.

**EFFESUS. Energy efficiency in European historic urban districts (2012-2016)** [58]. Se trata del proyecto de mayor escala y alcance hasta la fecha, en el que participaron 13 países, con 10 paquetes de trabajo y 23 socios. Se recopilaron de manera sistemática y analizaron bases de datos y documentos sobre las diferentes legislaciones nacionales. Fue el primer proyecto en avanzar desde la escala de edificio y componente hasta la escala urbana, proponiéndose como principal objetivo la investigación en eficiencia energética de distritos históricos europeos. De los siete casos de estudio, tres son ciudades históricas de enorme valor patrimonial: Santiago de Compostela (España), Visby (Suecia) y Génova (Italia). A escala de edificio, se escogieron casos en Bamberg (Alemania), Budapest (Hungría), Estambul (Turquía) y Glasgow (Escocia). Fue también el primer proyecto en incluir expertos en gestión de ayuntamientos y gobiernos locales trabajando sobre la superación de las barreras técnicas y no técnicas identificadas, en preocuparse por la transferencia de resultados, en utilizar análisis multi-escalares basados en sistemas GIS, y el primero en generar una herramienta de toma de decisiones tipo DSS (*Decision Support System*) que incluye metodología y software para evaluar la actualización energética de barrios históricos. Ha sido testada en Visby (Suecia) [59].

**HeLLO. Heritage energy Living Lab on-site (2018-2020)** [60]. Proyecto financiado por el programa europeo de investigación Horizon 2020. Su principal objetivo fue crear un laboratorio en un edificio histórico real donde poder probar *in situ* el rendimiento de algunos materiales aislantes. Las pruebas se llevaron a cabo en el Palazzo Tassoni Estense de Ferrara, sede del Departamento de Arquitectura y edificio monumental de gran interés arquitectónico [61].

**VIOLET. PreserVe tradtional buiLdings through Energy reducTion (2017-2021)** [62]. Proyecto europeo INTERRREG que pretende el diseño e implementación, en las regiones de los diferentes países participantes, de Planes de Acción encaminados a la mejora de una o varias políticas concretas existentes sobre rehabilitación energética de edificios históricos. Por primera vez se aborda la necesidad de un cambio estratégico que enfoque de manera integral la rehabilitación energética de los edificios de interés arquitectónico, trabajando desde una óptica multidisciplinar e involucrando a todos los agentes implicados: administración pública, sector privado e investigación. La Agencia de Vivienda y Rehabilitación de Andalucía (AVRA) de la

Junta de Andalucía participó como socia del proyecto, junto a instituciones públicas de Alemania, Chipre, Francia, Holanda y Rumanía.

La doctoranda y su director de tesis, Juan José Sendra Salas, en calidad de investigadores, fueron responsables junto con AVRA, de la elaboración del Plan de Acción para Andalucía, tarea que abarcó el periodo entre mayo y diciembre de 2019. La política concreta escogida fue el Programa de Rehabilitación de Edificios Públicos de Interés Arquitectónico (PREPIA), gestionado por la Secretaría General de Vivienda de la Consejería de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio (CFIOT) de la Junta de Andalucía. El plan fue aprobado y muy bien acogido por los responsables europeos en enero de 2020 y actualmente se encuentra en fase final de implementación. Con posterioridad, la doctoranda fue contratada durante un año, entre julio de 2020 y julio de 2021, por la misma consejería para la realización del análisis de viabilidad de la aplicación de la metodología propuesta en la norma europea UNE-EN 16883:2018. *Conservación del patrimonio cultural. Guía para la mejora de la eficiencia energética de los edificios históricos* [54] en los edificios del PREPIA, en cumplimiento de uno de los objetivos fijados en el Plan de Acción. Como casos de estudio se seleccionaron edificios públicos situados en las provincias de Sevilla y Granada. La doctoranda solicita la mención de Doctorado Industrial en relación al trabajo mencionado relativo a su participación en el proyecto VIOLET, dada su directa relación con los objetivos de la presente tesis doctoral.

Reflejo de la aceleración de la investigación producida desde 2010 sobre la eficiencia energética en edificios históricos es la publicación reciente de cinco revisiones. La primera fue redactada por Martínez-Molina *et al.* [63] en 2016. Se centra en el análisis de las principales publicaciones sobre la materia desde 1978 hasta 2014. Los autores identificaron las tendencias en motivación, objetivos, tipologías edificatorias, antigüedad de los edificios analizados y origen por países y destacaron la enorme aceleración en publicaciones registrada en la última década. La revisión de Webb de 2017 [64] supone un avance muy importante en el análisis de los criterios, las metodologías y los diferentes procesos de toma de decisiones implicados en la rehabilitación energética de los edificios históricos. La originalidad de la revisión de Berg *et al.* [65], del mismo año, radica en que, por primera vez, se analizó el impacto del comportamiento humano en la eficiencia energética de los edificios históricos, y reivindicó la importancia de este tipo de enfoque multidisciplinar, menos invasivo, frente al más extendido que se concentra únicamente en aspectos técnicos y constructivos. En 2018 Lidelöw *et al.* [66] publicaron una revisión orientada a identificar cómo había sido abordada la complicada relación entre eficiencia energética y preservación de los valores patrimoniales de los edificios. Los autores concluyeron que, habitualmente, éstos no son explícitamente articulados ni analizados dentro del plan de rehabilitación, restando riqueza a la metodología. Por último, cabe mencionar la revisión de Cabeza *et al.* [67], del mismo año, que analizó la integración de sistemas de energía renovable y otros de sistemas de alta eficiencia para ventilación y acondicionamiento térmico en los edificios históricos. Los autores estudiaron veintiocho edificios reales de varios países donde tales sistemas han sido implantados, señalando las dificultades y barreras, pero también las evidencias en la mejora de la eficiencia, el bienestar interior y la funcionalidad.

Del análisis de la bibliografía existente, puede concluirse que los países líderes en investigación sobre esta materia son Italia y UK [63]. En **Italia**, como en España y resto de los países de la UE, los edificios protegidos están exentos del cumplimiento de estándares exigentes de eficiencia energética, pero, dada la relevancia cultural y económica de su patrimonio, es el país del mundo con mayor número de publicaciones [68], [69] y, desde 2014, el país cuenta con una *Guía de Eficiencia Energética en Edificios Históricos* elaborada por la *Sapienza Università di Roma* [70]. No obstante, la mayoría de los trabajos de investigación realizados desde Italia se han centrado en edificios históricos públicos de uso terciario o cultural con valor histórico-artístico excepcional [71], [72], [73], [74], tanto en aspectos metodológicos [75], [76] como en técnicas de medición y experimentación sobre los elementos constructivos [77], [78], siendo excepcionales los casos de estudio de edificios patrimoniales de vivienda [79].

**Reino Unido** fue en 2012 el único país europeo en incluir a los edificios patrimoniales en el *Green Deal*, un ambicioso programa nacional de subvenciones a la rehabilitación energética. Ello aceleró las intervenciones en edificios catalogados y originó pronto una gran producción científica, impulsada por universidades, centros de investigación y también por organizaciones como la *Society for the Protection of Ancient Buildings* (SPAB) [80] y *Historic England* [81]. Ambas organizaciones aglutinan importantes instituciones públicas y privadas, universidades e industria y se constituyeron pronto en órganos de asesoramiento y apoyo, impulsando proyectos de investigación que ayudaran a la realización de mediciones y recopilación de datos, así como al análisis científico riguroso del comportamiento energético real de estos edificios. El enfoque práctico que los británicos han dado a la cuestión se ha materializado en multitud de publicaciones, libros, guías y documentos técnicos de apoyo a propietarios y profesionales, de acceso abierto y basados en el conocimiento adquirido por la práctica y también por la transferencia de conocimiento propiciada con las universidades y centros de investigación. En contrapartida a estos logros, el hecho de haberse constituido como el país pionero en la rehabilitación energética de los edificios históricos, lo ha convertido también en el primer lugar donde antes empezaron a registrarse efectos adversos imprevistos, propiciados por la aplicación de fórmulas estandarizadas, como se ha descrito anteriormente. La experiencia británica demuestra que la rehabilitación de edificios patrimoniales con criterios exigentes de eficiencia energética es una cuestión compleja que requiere metodologías científicas rigurosas para evitar la sobreinversión y el daño de los valores protegidos. En vista del desarrollo de los acontecimientos, la SPAB ha creado una herramienta práctica de apoyo a profesionales conocida como *Guidance Wheel*, destinada a la toma de responsable de decisiones sobre la rehabilitación de los edificios antiguos [82]. En **Francia**, la alianza conocida como CREBA [83] ha generado numerosa documentación técnica basada en casos reales, una herramienta de apoyo a profesionales similar a la británica y una etiqueta certificadora propia. De este país destaca un trabajo muy temprano de Cantin et al. [84], pionero en abordar la complejidad y diversidad de los abundantes edificios históricos franceses para caracterizar su comportamiento energético. En otros países del norte y centro de Europa son comunes los programas de investigación específicos, incentivos económicos y sellos propios (como DUMO en Holanda [85]), para

garantizar que las rehabilitaciones se hacen según criterios de calidad y seguridad. En **Suiza** destacan los trabajos de Florio [86], [87], pioneros en abordar cuantitativamente la contaminación visual producida por los colectores solares, fotovoltaicos y térmicos, sobre el paisaje urbano histórico, cuya metodología ha sido aplicada recientemente a la ciudad de Ginebra [88]. En 2019 Lingfords *et al.* [89], dentro de la misma área de conocimiento, desarrollaron un método alternativo para evaluar los edificios de Estocolmo y Visby desde el triple criterio de sus valores patrimoniales, la irradiación solar y la visibilidad.

En el sur de Europa, las dificultades de adaptación de las normativas sobre eficiencia energética y confort térmico de los edificios patrimoniales de Italia, Portugal y España fue tratado por Ornelas *et al.* [90], en 2016, revelando la necesidad de homogeneizar procedimientos y metodologías. En **Portugal**, la investigación científica se centró en una primera fase en las patologías propias de los edificios históricos y su impacto en el comportamiento energético [91], [92], [93]. Actualmente se registra un creciente número de trabajos realizados desde centros de investigación portugueses dedicados a la eficiencia energética y condiciones ambientales interiores de los edificios históricos. La mayoría se centran en edificios de uso público y valores patrimoniales excepcionales, como iglesias [94], [95], [42]; otros en soluciones constructivas para la mejora del comportamiento de la envolvente de los edificios patrimoniales [96], en las metodologías de evaluación de rehabilitación de centros urbanos históricos [97] o en el papel del comportamiento humano en el control de las condiciones interiores [98]. En **España**, a pesar de la riqueza y abundancia de su patrimonio edificado, la producción científica sobre eficiencia energética de edificios históricos es todavía muy escasa [99], [100], [101]. Destacan los recientes trabajos realizados desde el grupo de investigación PAIDI de Andalucía donde se ha desarrollado la presente tesis doctoral (TEP 130 Arquitectura, Patrimonio y Sostenibilidad: Acústica, Iluminación, Óptica y Energía): los de Muñoz-González *et al.* [102], [103] sobre iglesias de Andalucía y el de Blázquez *et al.* [104] sobre un edificio de viviendas patrimonial construido a principios de los años cincuenta del pasado siglo en Sevilla.

En este contexto, la **motivación** de esta tesis es, en primer lugar, contribuir a la investigación en este campo emergente. Cabe mencionar los cuatro trabajos de investigación publicados recientemente como artículos científicos por la autora y su director de tesis, por los que la autora opta a la modalidad de tesis doctoral por compendio de la Universidad de Sevilla [16], [105], [106], [107]. Estos trabajos se centran en la vivienda patrimonial de los centros históricos de ciudades de clima mediterráneo, todavía dotadas de gran vitalidad y donde los edificios residenciales catalogados constituyen el grupo mayoritario. A pesar de que su abundancia las convierte en indispensables para la conservación sostenible de barrios históricos completos, hasta la fecha han recibido escasa o nula atención. Si bien, como se deduce de la bibliografía citada, en Europa son relativamente frecuentes los estudios sobre edificios históricos de uso público catalogados bajos altos niveles de protección, los de vivienda patrimonial son prácticamente inexistentes.

En segundo lugar, el trabajo desarrollado en esta tesis pretende contribuir a la generación del conocimiento necesario para avanzar en la creación de nuevos indicadores de eficiencia energética más apropiados que los actuales a la realidad de los edificios patrimoniales de vivienda de las ciudades mediterráneas, permitiendo así su integración en planes de rehabilitación específicamente diseñados.

En tercer lugar, los resultados de esta tesis también pueden contribuir a la mejora de la práctica arquitectónica de rehabilitación de este tipo de edificios, normalmente de iniciativa privada y bajo estrictas reglas de rentabilidad económica. En ella se atiende necesariamente a las obligadas normas de protección patrimonial pero la eficiencia energética, legalmente dispensable, suele quedar relegada a la aplicación de unas pocas fórmulas de uso generalizado insuficientemente testadas. Las intervenciones de pequeña escala realizadas por particulares quedan generalmente fuera del control de técnicos especializados y se suelen descartar grandes inversiones en ahorro energético. En el caso de rehabilitar un edificio catalogado completo para la venta libre de sus viviendas, pueden también eludirse muchos tipos de mejoras porque no resultan obligatorias, al estar el edificio exento del cumplimiento del Código Técnico sobre ahorro de energía, y porque los futuros costes energéticos no repercuten directamente en los inversores. Debido al alto precio de la vivienda de los centros históricos de las ciudades mediterráneas, la rentabilidad económica de rehabilitar edificios completos depende directamente del aumento de edificabilidad. Ello conlleva necesariamente un aumento de la ocupación original y, por tanto, de la demanda energética. Si este proceso rehabilitador, que no está obligado a atender necesariamente a las reglas de la eficiencia energética, se extiende a la mayoría de los edificios patrimoniales existentes, el resultado más previsible es un aumento considerable de las emisiones de CO<sub>2</sub> en los centros históricos. Los sistemas renovables basados en colectores solares (fotovoltaica y termo-solar) consumen mucho espacio en cubiertas o azoteas, de enorme valor de uso y económico, y en numerosas ocasiones resultan de difícil encaje con la normativa de control del impacto visual.

En la presente tesis se han estudiado cuatro viviendas patrimoniales del tipo más común en los centros históricos mediterráneos. No pertenecen a edificios con valores históricos o artísticos extraordinarios, sino a edificios catalogados con niveles bajos o medios de protección, que son los más abundantes. La selección de este grupo ha obedecido a dos razones: la primera es que, por ser su número mayor, el impacto de su descarbonización sobre el conjunto urbano completo será más relevante que el de las viviendas localizadas en edificios de valor patrimonial excepcional, mucho menos numerosos; y la segunda es que, precisamente por gozar de una protección más *blanda*, el margen para la intervención y la mejora es mayor. Rehabilitar energéticamente el conjunto de las viviendas patrimoniales más comunes en las ciudades históricas de Andalucía, acercando su comportamiento a los de los edificios de *consumo energético casi nulo*, acarrearía enormes beneficios medioambientales y socio-económicos. Uno de los más importantes es la mejora de las condiciones de bienestar térmico y calidad de aire interior, aminorando los riesgos sobre la salud de los residentes, sobre todo de los más vulnerables, que pasan la mayor parte del tiempo en casa. E igualmente significativa sería la

reducción de los costes energéticos y la lucha contra la pobreza energética en igualdad de condiciones con el resto de viviendas no patrimoniales. Las nuevas viviendas históricas eficientes, saludables y poco contaminantes alentarían la ocupación de los centros históricos, mitigando la gentrificación y favoreciendo su mantenimiento sostenible.

Las cuatro viviendas estudiadas se localizan en edificios catalogados del Conjunto Histórico de Sevilla, que es un área urbana idónea para los objetivos planteados. En primer lugar, porque es un área histórica extensa, de dimensiones similares al de Venecia o Génova, que ocupa 793.5 ha, el 5.54% del suelo del término municipal de Sevilla. En segundo lugar, porque es densa en protección patrimonial: en cada hectárea hay 9 edificios protegidos. Contiene 11,029 inmuebles de los cuales 6,875 (el 61%) están catalogados, es decir, sujetos a algún tipo de protección que les exime de ser rehabilitados bajo criterios de eficiencia energética. En tercer lugar, porque goza del mayor grado de protección que se concede a un bien patrimonial en España, “Bien de Interés Cultural” (BIC), y el conjunto compuesto por Alcázar, Catedral y Archivo de Indias forma parte de la Lista de Patrimonio Mundial de la UNESCO desde 1987, hecho que afecta directamente a las posibles transformaciones urbanas en un radio de 100 metros a su alrededor, o incluso más allá si su integridad visual se viera comprometida. Las cuatro viviendas escogidas, que se analizaron en condiciones operacionales y de uso, se localizan en el sector de planeamiento San Gil-Alameda, el más densamente poblado del conjunto histórico [15], donde los edificios residenciales suponen el 99% del total existente y de ellos el 61% están incluidos en el Catálogo de Protección del Plan Especial de Protección del Conjunto Histórico de Sevilla [108]. Su selección obedeció a un triple criterio de representatividad según nivel de protección, tipología y diversidad de patrón de uso. Estos tres factores son de gran relevancia en el comportamiento energético de los edificios históricos: el nivel de protección puede restringir el tipo de intervención sobre la envolvente; la tipología está relacionada con la geometría, la compacidad y el uso; y el patrón de uso, o comportamiento humano en el uso de la energía, es globalmente reconocido como uno de los factores con mayor impacto en el desempeño energético de los edificios, especialmente de las viviendas [109], [110], [111], [112], [113]. Además, la adecuación general de los edificios y viviendas escogidos a los objetivos del proyecto, así como la disposición de los residentes a cooperar, también fueron decisivos en el proceso de selección.

Las viviendas fueron monitorizadas, analizadas y diagnosticadas en condiciones de verano e invierno, proponiéndose soluciones activas y pasivas para su rehabilitación energética. La metodología utilizada incluyó simulación energética dinámica y toma experimental de datos sobre el comportamiento de su envolvente, los patrones de uso de la energía de sus residentes y la evolución horaria de los parámetros ambientales exteriores e interiores más relevantes. Se comprobó que la necesaria introducción de energía renovable puede realizarse mediante sistemas energéticos híbridos, no exclusivamente basados en tecnologías de captación solar con alto impacto paisajístico, si no en maduras tecnologías de intercambio de calor. Las conclusiones de esta investigación permitieron afirmar que, respetando las reglas de la protección patrimonial, el margen de mejora de este tipo de edificios es considerable y no debe ser subestimado.



## 1.1. Estructura de la tesis.

Esta tesis doctoral se presenta por la modalidad especial de compendio de publicaciones y se estructura en dos bloques:

- **Bloque A.** Contiene cuatro capítulos. En el primero se desarrolla la introducción en la que se justifica la unidad temática de los trabajos presentados; en el segundo, se enuncia la hipótesis y los objetivos que se pretende alcanzar; en el tercero, el resumen global de los resultados y la discusión de éstos y en el cuarto, las conclusiones. Su contenido responde lo exigido por la Normativa de Estudios de Doctorado de la Universidad de Sevilla<sup>1</sup>.
- **Bloque B.** Incluye las cuatro publicaciones realizadas a lo largo del periodo de formación doctoral.

Los resultados de la investigación llevada a cabo en esta tesis doctoral han sido publicados y difundidos en tres artículos de revistas indexadas en *Journal Citation Report* (JCR) y en un artículo de una revista indexada en *Scimago Journal & Country Rank* (SJR).

Las revistas indexadas en JCR en las que se ha publicado son: *Sustainable Cities and Society* (1 artículo; cuartil 1) y *Energy and Buildings* (2 artículos; cuartil 1). Ambas pertenecen al prestigioso grupo editorial Elsevier y se encuentran entre las revistas más citadas por la comunidad científica en el campo de la sostenibilidad medioambiental y la resiliencia urbana, la primera, y en el campo del uso de la energía en los edificios, la segunda.

A partir de una comunicación oral presentada en el congreso *Sustainable City 2017 del Wessex Institute of Technology* (UK), desarrollado en Sevilla entre el 18 y el 20 de septiembre de 2017, derivó una publicación en la revista indexada en SJR *International Journal of Sustainable Development and Planning* (cuartil 3).

En correspondencia con los tres objetivos específicos enunciados en el segundo capítulo del presente Bloque A, las publicaciones que componen la presente tesis se organizan en las siguientes secciones:

### **Sección 1. Cartografía del patrimonio urbano histórico de Sevilla y metodología de selección de edificios representativos para análisis energéticos.**

Se analiza el Conjunto Histórico de Sevilla en el contexto urbano ampliado de su término municipal, con el fin de proponer una metodología de tipo cuantitativo que sustente la selección de edificios o conjuntos patrimoniales representativos para la realización de análisis energéticos. Los trabajos preliminares para la consecución de este objetivo fueron realizados por la autora en su Trabajo de Fin de Máster en Ciudad y Arquitectura Sostenibles de la Universidad de Sevilla, presentado en noviembre de 2016 [15]. El método, mediante el cual se mapeó la *densidad*

---

<sup>1</sup> Boletín Oficial de la Universidad de Sevilla, Número 2/2020, 24 de febrero. Resolución de la Secretaria General de la Universidad de Sevilla de 17 de febrero de 2020 por la que se procede a la elaboración de la versión consolidada del texto de la Normativa de Estudios de Doctorado de la Universidad de Sevilla.

*patrimonial* del Conjunto Histórico de Sevilla, se basa en el análisis estadístico de los datos sobre población, frecuencia de tipologías históricas y de niveles de catalogación, siendo estos dos últimos los establecidos por el Plan Especial de Protección del Conjunto Histórico de Sevilla.

El contenido de esta sección se presenta en un artículo ya publicado en coautoría con el director de esta tesis doctoral.

- **Artículo 1.** Caro-Martínez, R; Sendra, J.J; Implementation of urban building energy modeling in historic districts. Seville as case-study, *International Journal of Sustainable Development and Planning* 13(4), 528-540 (2018).

DOI: [10.2495/SDP-V13-N4-528-540](https://doi.org/10.2495/SDP-V13-N4-528-540).

Índice de impacto de la revista (SJR 2018): 0.221. Geography, Planning and Development, Q3 (424/791).

## **Sección 2. Comportamiento energético y condiciones ambientales interiores de viviendas en edificios patrimoniales de ciudades históricas de clima mediterráneo.**

El objetivo de esta sección es profundizar en el conocimiento sobre el desempeño energético y las condiciones ambientales interiores (temperatura, humedad relativa y concentración de CO<sub>2</sub>) de viviendas reales, en estado de ocupación y pleno funcionamiento, localizadas en edificios patrimoniales bajo condiciones del clima mediterráneo. Como casos de estudio se tomaron cuatro viviendas de edificios catalogados del sector urbano San Gil-Alameda del Conjunto Histórico de Sevilla. La selección de este sector y de los cuatro edificios caso de estudio se basó en los avances realizados en la Sección 1 anterior y en el cálculo de la distribución de frecuencia del nivel de catalogación, de las tipologías históricas y de la población residente en los diferentes sectores de planeamiento establecidos por el Plan Especial de Protección del Conjunto Histórico de Sevilla.

La metodología de evaluación fue de tipo mixto y se basó en el análisis simultáneo de los datos cuantitativos recabados mediante la monitorización de las variables ambientales mencionadas y la información cualitativa recabada en entrevistas y encuestas con los residentes sobre sus costumbres en relación con el consumo energético y las preferencias de confort, con el fin de establecer perfiles de uso y ocupación ajustados a la realidad. Puesto que en los edificios catalogados el margen de mejora de su envolvente está generalmente restringido, se consideró importante determinar el peso de este aspecto en el balance energético global. Los resultados sobre comportamiento energético de cada una de las viviendas se organizaron en dos grupos: los referentes a factores relacionados con la envolvente y los referentes a factores relacionados con el comportamiento humano.

El trabajo desarrollado en esta sección queda reflejado en dos publicaciones, una referida a las condiciones de verano y otra a las condiciones de invierno.

- **Artículo 2.** Caro, R; Sendra, J.J; Evaluation of indoor environment and energy performance of dwellings in heritage buildings. The case of hot summers in historic cities in Mediterranean Europe, *Sustainable Cities and Society* 52, 101695, 1-12 (2019).  
DOI: 10.1016/j.scs.2019.101798.  
Índice de impacto de la revista (JCR 2019): 5.268. *Construction & Building Technology* Q1 (5/63).
- **Artículo 3.** Caro, R; Sendra, J.J; Are the dwellings of historic Mediterranean cities cold in winter? A field assessment on their indoor environment and energy performance, *Energy and Buildings* 230, 110567, 1-18 (2021).  
DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110567.  
Índice de impacto de la revista (JCR 2020): 5.879. *Engineering, Civil*, Q1 (9/137).

### **Sección 3. Introducción de energía renovable en los edificios patrimoniales de vivienda en clima mediterráneo.**

En esta sección se tomó un edificio específico de los seleccionados anteriormente, un corral de vecinos situado en la calle Sagunto de Sevilla, construido en el siglo XVIII y catalogado con nivel C, como caso de estudio para analizar el potencial de los sistemas energéticos híbridos para la descarbonización de los edificios históricos. Un sistema energético híbrido es aquél capaz de utilizar, con altos niveles de eficiencia, energía procedente de fuentes renovables en combinación con energía no renovable proveniente de redes públicas de abastecimiento, como el gas o la electricidad. En esta investigación se analizó un sistema de bomba de calor aire-agua de alta eficiencia que abastece, en combinación con electricidad de la red pública, de energía térmica (refrigeración, calefacción y agua caliente sanitaria) a las trece viviendas del edificio caso de estudio para el que se modeló, previamente, un plan integral de rehabilitación basado en los resultados obtenidos en la Sección 2.

El interés de tal sistema, basado en una tecnología madura, estriba en que, en el contexto de una red pública de electricidad cada vez menos dependiente de fuentes de energía de origen fósil, como la española [114], puede, por sí mismo, en el corto y medio plazo, contribuir a aproximar el comportamiento energético de los edificios patrimoniales rehabilitados al de los no patrimoniales, sin incurrir en el menoscabo de sus valores protegidos, del paisaje urbano histórico en que se insertan, ni de los restos arqueológicos del subsuelo.

Los resultados de investigación de la Sección 3 han dado lugar a la siguiente publicación, en coautoría con el director de la presente tesis y con la colaboración de la investigadora doctora de la Universidad de Málaga, Carmen María Muñoz González, todos ellos miembros del grupo de investigación del PAIDI TEP 130 de la Universidad de Sevilla:

- **Artículo 4.** Caro, R; Sendra, J.J.; Muñoz González, C.M.; The role of hybrid systems in the decarbonization of residential heritage buildings in Mediterranean climate. A case study in Seville, Spain, *Energy and Buildings* 250, 111302, 1-19 (2021).

DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111302.

Índice de impacto de la revista (JCR 2020): 5.879. Engineering, Civil, Q1 (9/137).

La presente tesis doctoral opta a Mención de Doctorado Industrial por la Universidad de Sevilla, en virtud del cumplimiento de las condiciones recogidas en el artículo 69, sección 4ª, de la Normativa de Estudios de Doctorado de la Universidad de Sevilla. Se cumple la circunstancia de la existencia de un contrato mercantil de la doctoranda con la Consejería de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio (CFIOT) de la Junta de Andalucía, mencionado anteriormente. Este contrato, de un año de duración, supuso un desarrollo experimental en directa relación con los objetivos de la presente tesis, como se refleja en la memoria visada presentada en la Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad de Sevilla (EIDUS).

Los trabajos realizados en cumplimiento de este contrato consistieron en la realización de un análisis de viabilidad de la aplicación de la norma UNE-EN 16883, *Conservación del patrimonio cultural. Guía para la mejora de la eficiencia energética de los edificios históricos*, a los edificios históricos pertenecientes al Plan de Rehabilitación de Edificios Públicos de Interés Arquitectónico (PREPIA), y fue realizado en el marco del proyecto Interreg VIOLET, anteriormente descrito. Estos trabajos, junto con la tarea previa de redacción del Plan de Acción VIOLET para Andalucía, realizada por la doctoranda junto con su director de tesis, Juan José Sendra Salas, entre mayo y diciembre de 2019, son una muestra de la capacidad de transferencia de esta investigación a las administraciones públicas que promueven rehabilitación energética de los edificios patrimoniales, como la Junta de Andalucía. El contrato mencionado se aporta entre la documentación exigida para la presentación de la tesis que opta a Mención de Doctorado Industrial, de acuerdo a los artículos 74.g y 74.h de la Normativa de Estudios de Doctorado de la Universidad de Sevilla.

## Capítulo II. Hipótesis y objetivos.

Esta tesis parte de la hipótesis de que es técnicamente posible mejorar significativamente la eficiencia energética de los edificios patrimoniales de vivienda de las ciudades históricas mediterráneas, así como disminuir su nivel de emisiones de CO<sub>2</sub> y mejorar sus condiciones ambientales interiores, sin poner en riesgo la preservación de sus valores protegidos ni los del paisaje urbano en el que se insertan.

### 2.1. Objetivo general.

Para confirmar la hipótesis descrita se establece un objetivo general:

**OG1.** Verificar si es posible aplicar un conjunto de medidas, tanto activas como pasivas, cuya implementación aumente la eficiencia energética, disminuya las emisiones de CO<sub>2</sub> y mejore las condiciones ambientales interiores de las viviendas patrimoniales en zonas de clima mediterráneo, sin menoscabar los valores protegidos de los edificios ni los del paisaje urbano en que se insertan (artículos 2, 3 y 4).

### 2.2. Objetivos específicos.

Esta tesis se presenta por compendio de publicaciones agrupadas en las tres secciones señaladas en la Introducción del presente Bloque A. Cada una de estas secciones da respuesta a uno de los siguientes objetivos específicos.

**OE1.** Analizar el Conjunto Histórico de Sevilla para establecer una metodología encaminada a la selección del barrio y grupo de edificios más apropiados al alcance y objetivos generales de la investigación (artículo 1).

**OE2.** Analizar y evaluar, en condiciones reales de ocupación, tanto de verano como de invierno, el comportamiento energético, el confort higrotérmico y la calidad de aire interior de viviendas localizadas en edificios catalogados del Conjunto Histórico de Sevilla (artículos 2 y 3).

**OE3.** Evaluar la contribución de los sistemas energéticos híbridos a la descarbonización de los edificios residenciales patrimoniales, sin que su implementación provoque conflicto con las reglas de protección del patrimonio arquitectónico, arqueológico o del paisaje urbano histórico (artículo 4).



## Capítulo III. Resumen y discusión de resultados.

Tal y como se expone en la introducción, la presente tesis doctoral se presenta por compendio de publicaciones, que incluyen un primer artículo en revista indexada en SJR y tres artículos en revistas indexadas en JCR. Estas cuatro publicaciones se organizan en tres secciones, cada una de las cuales da respuesta a uno de los tres objetivos específicos descritos en la sección anterior, de acuerdo al siguiente esquema:

**Sección 1.** Cartografía del patrimonio urbano histórico de Sevilla y metodología de selección de edificios representativos para análisis energéticos.

- Objetivo específico 1. Artículo 1

**Sección 2.** Comportamiento energético y condiciones ambientales interiores de viviendas en edificios patrimoniales de ciudades históricas de clima mediterráneo.

- Objetivos específicos 1 y 2. Artículos 2 y 3.

**Sección 3.** Introducción de energía renovable en los edificios patrimoniales de vivienda en clima mediterráneo.

- Objetivo específico 3. Artículo 4.

A continuación, se presenta el resumen y discusión de resultados correspondientes a cada sección y se termina el Capítulo III con una discusión general referente al conjunto total de resultados obtenidos en esta tesis.





### III.1. Sección 1. Cartografía del patrimonio urbano histórico de Sevilla y metodología de selección de edificios representativos para análisis energéticos.

En esta parte de la investigación se propuso una metodología de análisis energético a escala urbana, aplicable a barrios y conjuntos urbanos completos, basada en la manzana como unidad básica del tejido histórico. Su interés reside en que, por ser su número considerablemente menor al de los edificios individuales, las evaluaciones energéticas urbanas basadas en ellas pueden realizarse más eficientemente.

La metodología fue aplicada al Conjunto Histórico de Sevilla y se basó en la identificación de sus manzanas más representativas desde el punto de vista patrimonial. El grado de catalogación otorgado a cada edificio en el Plan Especial de Protección vigente fue adoptado como criterio de caracterización de las manzanas porque limita las soluciones de mejora de la eficiencia energética de los edificios. Una vez identificado el grupo de manzanas más representativas, se escogió una de ellas para ser evaluada energéticamente en dos estados: el estado original y el estado posterior a una rehabilitación energética diseñada en función del diagnóstico anterior y considerando las limitaciones impuestas por las reglas de protección patrimonial. Para ambos estados se calcularon la demanda energética, el consumo de energía final y primaria y las emisiones de CO<sub>2</sub>, referidos a la climatización de sus viviendas, responsable del 42% del consumo de energía de los hogares de la zona mediterránea en España [115]. La calefacción y refrigeración de las viviendas tiene un impacto directo sobre la salud de las personas, que adquiere creciente protagonismo ante el escenario de cambio climático. Estos resultados se compararon después con los valores límite impuestos por el Código Técnico de la Edificación vigente cuando se hicieron los análisis energéticos, para estimar la viabilidad de su aplicación a este tipo particular de edificios.

La investigación se apoyó en los estudios previos realizados por la doctoranda en su Trabajo Fin de Máster en Ciudad y Arquitectura Sostenibles [15] presentado en 2016, que profundizaron en el análisis del patrimonio construido del Conjunto Histórico de Sevilla, en la distribución espacial de su población y en la de sus edificios catalogados. Este análisis urbano requirió del procesamiento de tres bases de datos diferentes: (1) datos abiertos del Catastro [116] sobre subdivisión del municipio de Sevilla en manzanas y en inmuebles; (2) datos abiertos del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía [117] sobre población por secciones censales y barrios; y (3) catálogo de protección de edificios y elementos urbanos perteneciente al Plan Especial de Protección del Conjunto Histórico de Sevilla. Las tres bases de datos en formato *shape* fueron procesadas mediante la herramienta de Sistemas de Información Georeferenciado (SIG) Arc Map 10.2.1®. El estudio energético fue realizado con la herramienta de la simulación dinámica Design Builder® basada en el motor de cálculo Energy Plus®, de aceptación generalizada en la comunidad científica. El trabajo se realizó en tres fases consecutivas: la primera consistió en la generación de un procedimiento de selección de la manzana representativa y de los edificios caso de estudio; la segunda consistió en la evaluación energética de cinco edificios de la

manzana elegida en su estado original, la comparación con los valores límites establecidos por la normativa energética nacional y la extrapolación de resultados a la manzana completa; y en la tercera se propusieron medidas de mejora pasivas, principalmente sobre la envolvente, atendiendo a las limitaciones impuestas por la protección patrimonial.

### Fase 1.

Se comenzó delimitando el perímetro del ámbito de estudio. De la totalidad del territorio abarcado por el Plan Especial de Protección del Conjunto Histórico de Sevilla (coloreado en ocre claro en el mapa de la Fig. 1) se extrajeron aquellos sectores de planeamiento no significativos para los objetivos perseguidos en la investigación, centrada en el uso residencial: el Recinto de la Exposición Universal de 1929, Plaza de Armas, Húmeros y Cruz Roja. El ámbito de estudio seleccionado se redujo así al suelo urbano encerrado aproximadamente dentro de los límites de las murallas del siglo XII, representado en color marrón oscuro en la Fig. 1. Abarca 7.8 km<sup>2</sup> (el 5.5% de la superficie del término municipal). Su población actual es de 59,721 habitantes (8.6% de la población total), que viven en 539 manzanas y 10,559 edificios, de los cuales 7,050 edificios (el 67% del total existente) están catalogados. De los catalogados, el 95% están protegidos bajo los dos niveles inferiores, C y D, y sólo un 5% bajo los niveles superiores, A y B.

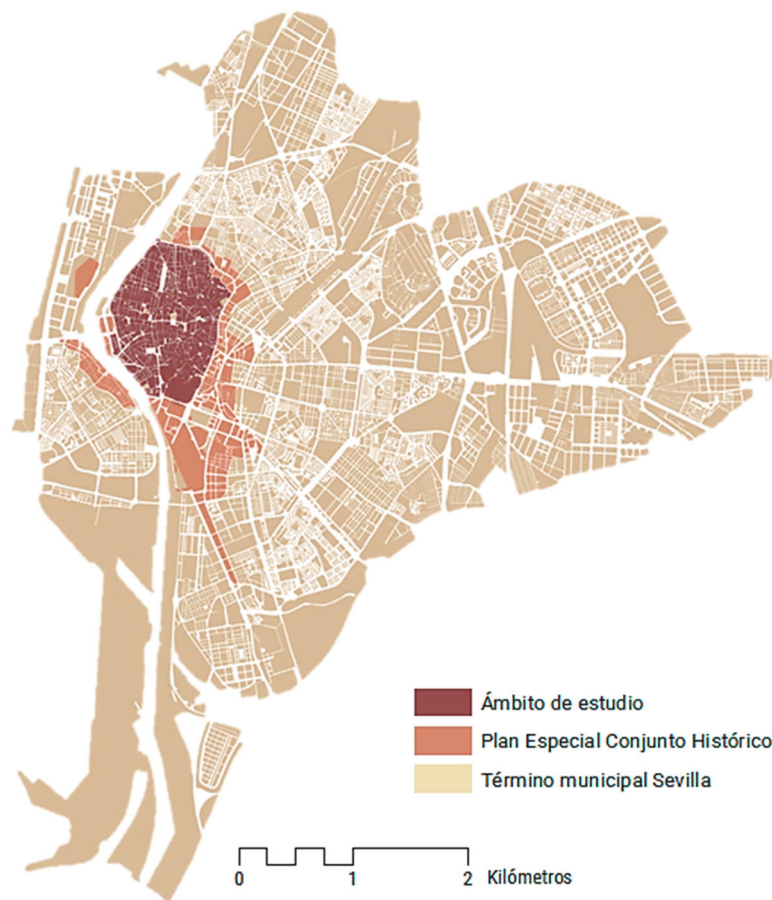


Fig. 1. Término municipal de Sevilla donde se destaca el territorio abarcado por el Plan Especial de Protección del Conjunto Histórico y el ámbito de estudio.

A continuación, se analizó la distribución en el territorio de los edificios catalogados incluidos en el ámbito de estudio seleccionado (Fig. 2). Cada edificio del Conjunto Histórico de Sevilla está catalogado bajo los niveles A, B, C o D, en orden decreciente de protección. Los niveles A y B se aplican a monumentos y gozan de protección *integral* y *global*, respectivamente, quedando su transformación muy limitada. El nivel C se aplica a edificios de interés tipológico y el D a edificios que contribuyen al mantenimiento de la identidad urbana. En los niveles C y D se permiten las obras de reforma y de ampliación de diferente intensidad en función de la tipología y las normas del planeamiento especial que le afecten.

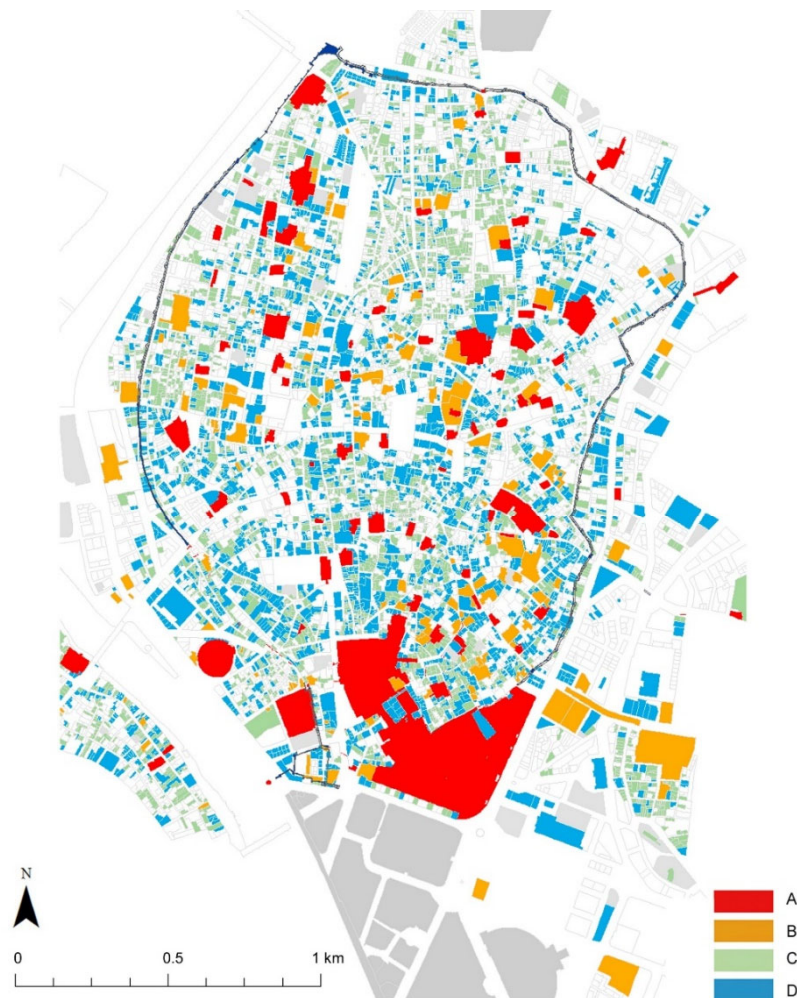


Fig. 2. Cartografía del catálogo de protección del Plan Especial de Protección del Conjunto Histórico de Sevilla con indicación de los niveles de catalogación de cada edificio.

Cada manzana está compuesta por una mezcla heterogénea de edificios no catalogados y catalogados bajo diferentes niveles; las manzanas más representativas desde el punto de vista patrimonial son aquellas que contienen la combinación más frecuente. Para identificarlas se generó un nuevo parámetro denominado *Densidad de Valor Patrimonial* (en inglés HAD por *Heritage Asset Density*) que se cartografió sobre el mapa del ámbito de estudio. El valor de HAD para cada manzana se calculó a partir de la asignación, a cada edificio protegido, de un número

entero entre 4 y 1 correspondiente a su calificación bajo los niveles A, B, C y D contemplados en el planeamiento. A los edificios no catalogados se les asigno el valor 0. HAD es la suma del valor numérico entero de cada edificio de la manzana considerada, según su nivel de catalogación, dividida por el número de edificios. Para cada manzana, HAD, que es independiente de la superficie ocupada o de la superficie construida de la manzana, tiene así un valor numérico no entero que representa la media ponderada de su valor patrimonial. Su distribución espacial puede verse en la Fig. 3.

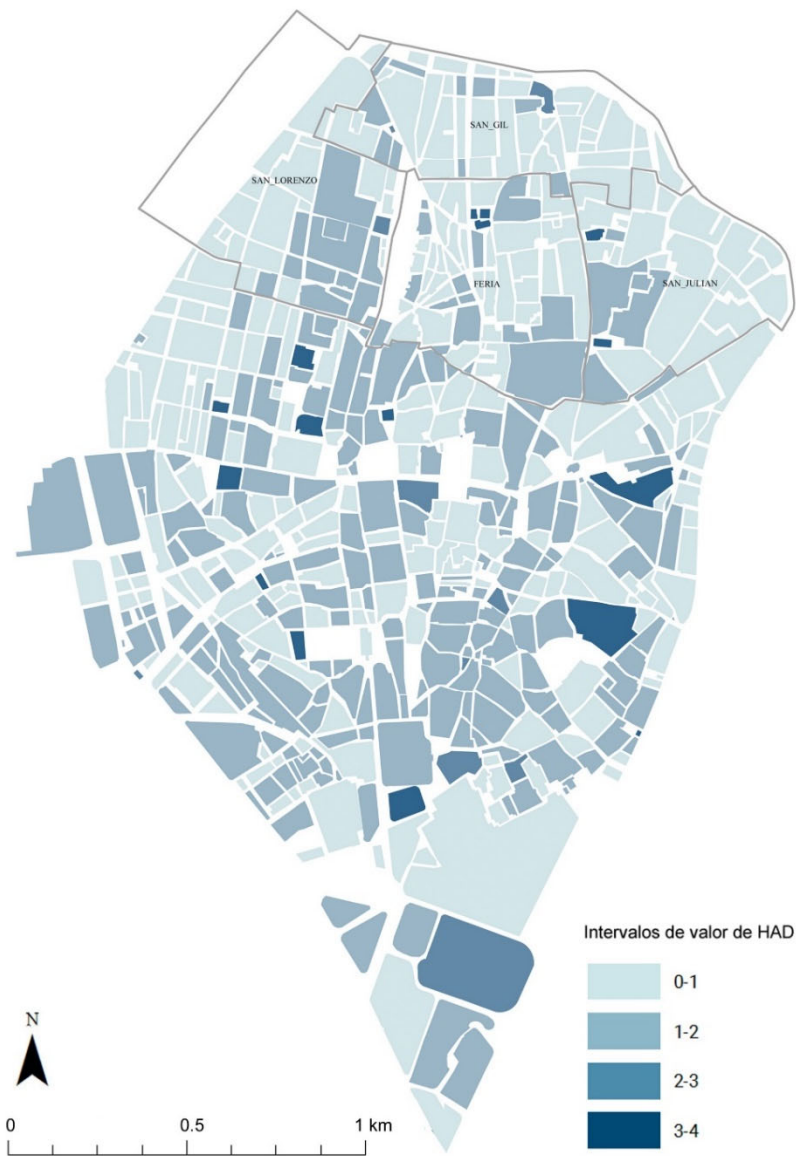


Fig. 3. Distribución espacial del parámetro HAD en las manzanas del ámbito de estudio con la delimitación de los cuatro barrios localizados al norte.

Los valores HAD más reducidos se localizan en los cuatro barrios más densamente poblados del Conjunto Histórico, localizados al norte, San Lorenzo, San Gil, Feria y San Julián, donde viven 24,331 personas, el 41% de la población total del Conjunto Histórico. Los más altos se dan al sur, donde el número de edificios monumentales es mayor y el número de habitantes menor. En

el histograma de la Fig. 4 se compara la distribución de frecuencia de HAD en la totalidad del ámbito de estudio (539 manzanas) con el de la zona norte (167 manzanas), clasificando cada manzana en uno de los cuatro intervalos de HAD establecidos (0-1, 1-2, 2-3 y 3-4). Los resultados reflejan que de las 12 manzanas en las que HAD alcanza el valor máximo de 4, sólo 2 están localizadas en la zona norte. El valor de HAD más frecuente es 1 para la totalidad del ámbito de estudio y 0,8 para la zona norte y, en cuanto a los valores medios, son 1,07 y 0,93, respectivamente. Las manzanas incluidas en el intervalo más frecuente se consideran representativas del conjunto urbano y, por tanto, son las más indicadas para la realización de análisis energéticos a esta escala.

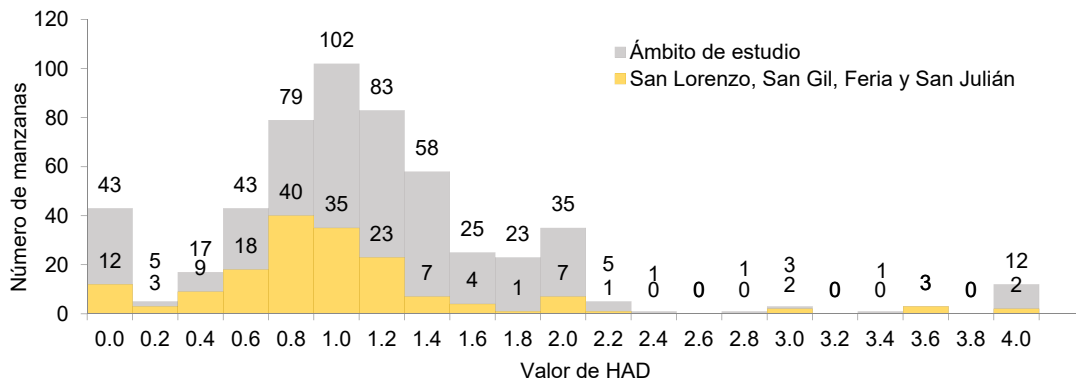


Fig. 4. Distribución de frecuencia de HAD en el ámbito de estudio (539 manzanas, color gris) y en el sector norte que incluye los barrios San Lorenzo, San Gil, Feria y San Julián (167 manzanas, color naranja).

Dado que esta investigación se centró en la vivienda patrimonial no singular, la manzana de estudio fue seleccionada de entre aquellas con valor de HAD más frecuente dentro de la zona norte de la ciudad, donde se concentran los edificios residenciales catalogados bajo las categorías más frecuentes, C y D, como se deduce del análisis realizado. La manzana seleccionada, cuyo valor HAD es de 0.78, está limitada por las calles Antonio Susillo al norte, Relator al sur, Señor de la Sentencia al este y Feria al oeste (Figs. 5 y 6). Su forma es aproximadamente cuadrada y sus linderos se alinean casi exactamente con las cuatro orientaciones solares principales. Contiene 23 edificios, 14 de los cuales están catalogados con niveles C o D.



Fig. 5. Orto fotografía de la manzana seleccionada.



Fig. 6. A la izquierda, vista de la manzana modelo desde la Calle Señor de la Sentencia, y a la derecha, desde la Calle Relator.

## Fase 2.

De la manzana seleccionada se escogieron cinco edificios catalogados: dos con fachada principal orientada al norte y tres con fachadas orientadas a sur, este y oeste. Se realizó un análisis energético de cada uno de ellos con herramientas de simulación dinámica, considerando cada planta como una única zona térmica. La geometría, en formato CAD, se obtuvo del Catastro y se completó con mediciones llevadas a cabo en el lugar. Los datos climatológicos para la simulación fueron los correspondientes a valores medios históricos de la Agencia Española de Meteorología (AEMET) [118] para Sevilla. Las condiciones operacionales y perfiles de uso fueron adoptadas del Código Técnico vigente en el momento de la realización del trabajo. El valor de los principales parámetros relativos a la envolvente fue adoptado de documentos reconocidos [119], en función de la fecha de construcción o de rehabilitación integral de cada edificio, obtenida del Catastro. En estos documentos se establecen dos periodos de construcción: antes de 1981, cuando se introdujo en España la primera normativa que limitaba la demanda térmica (NBE CT 79), y en el periodo 1981-2007, durante la vigencia de ésta y con anterioridad a la entrada en vigor del primer Código Técnico de la Edificación en 2006. Se obtuvieron valores de demanda de calefacción y de refrigeración, así como consumo de energía primaria no renovable y emisiones de CO<sub>2</sub>, para cada uno de los cinco edificios.

Estos resultados se compararon con los límites admisibles fijados por en la normativa energética vigente, aplicable a la rehabilitación integral de edificios no catalogados. Se extrajeron cuatro conclusiones principales: (1) los factores más determinante en la demanda térmica parecían ser la orientación de la fachada principal y la compactidad, mientras que el periodo de construcción no parecía ejercer un impacto apreciable; (2) en su estado original, dos de los cinco edificios estudiados demandaban menos energía de climatización que la máxima establecida en el Código Técnico vigente y el resto se desviaban menos del 30% de ese límite; (3) los edificios demandan menos energía para refrigeración que para calefacción, como ya demostraban estudios anteriores en la misma ciudad [120], [121], [122]; y (4) ninguno de los edificios cumplía con el requerimiento sobre consumo de energía primaria no renovable y el consumo medio duplicaba el máximo admisible. Dada la relevancia de la orientación solar de la fachada principal en la demanda térmica, este factor fue escogido para extrapolar los resultados desde el nivel del edificio al de la manzana. La demanda térmica de cada edificio simulado fue normalizada por superficie (kWh/m<sup>2</sup>) y, según la orientación solar de su fachada, multiplicada por la superficie ponderada del bloque completo. Las superficies de los edificios formando una esquina se dividieron por igual para ambas orientaciones solares. Los principales resultados a escala de manzana fueron: (1) en su estado actual, la manzana no solo cumple los límites de la normativa vigente de demanda de refrigeración, sino que esa demanda es un 4% inferior al valor máximo admisible; (2) por el contrario, el valor de la demanda de calefacción sería un 24% superior al valor máximo admisible; y (3) dado que el suministro de energía procede en su totalidad de la red pública de electricidad y gas natural, las emisiones de CO<sub>2</sub> son elevadas y la manzana obtendría una calificación E en el sistema nacional de certificación.

### Fase 3.

En función de los resultados anteriores, se propuso una serie de medidas de mejora que redujeran la demanda térmica a los valores límites de la normativa vigente. Éstas se aplicaron, en diferentes combinaciones, a cada uno de los cinco edificios analizados. La serie comprendió la extensión del periodo de ventilación natural nocturna en verano, el aumento de la estanqueidad al aire y de la transmitancia térmica de las ventanas a los valores límite de la normativa vigente. También se incluyó la colocación de aislamiento térmico por la cara exterior de los cerramientos de los patios interiores de la manzana, que es la única superficie vertical de la envolvente no afectada por la protección patrimonial. No se consideró la intervención en cubiertas ni en soleras. Tanto la eficiencia de los sistemas de climatización como los perfiles operacionales y de uso fueron los mismos que los de la fase anterior, con la excepción mencionada de la ventilación natural. Los resultados mostraron que:

- En todos los edificios era necesario aumentar la extensión del periodo de ventilación nocturna.
- En dos de cinco edificios no fue necesario modificar las ventanas ni añadir aislamiento térmico en ningún punto de su envolvente.
- En tres de los cinco edificios fue necesaria la sustitución del 100% de sus ventanas (marco y vidrio) por otras nuevas con prestaciones acordes a la normativa vigente en el momento de realizar el análisis.
- En tres de los cinco fue necesaria la instalación de aislamiento térmico por la cara exterior de los muros del patio de manzana, en diferente proporción de cobertura: en dos edificios la proporción no alcanzaba el 70% y en solamente en uno alcanzó el 100% de la superficie.
- Como las fuentes energéticas no se cambiaron, el consumo de energía primaria no renovable excedía por mucho los valores límite del CTE DB HE0 vigente, como se muestra en la Fig. 7.

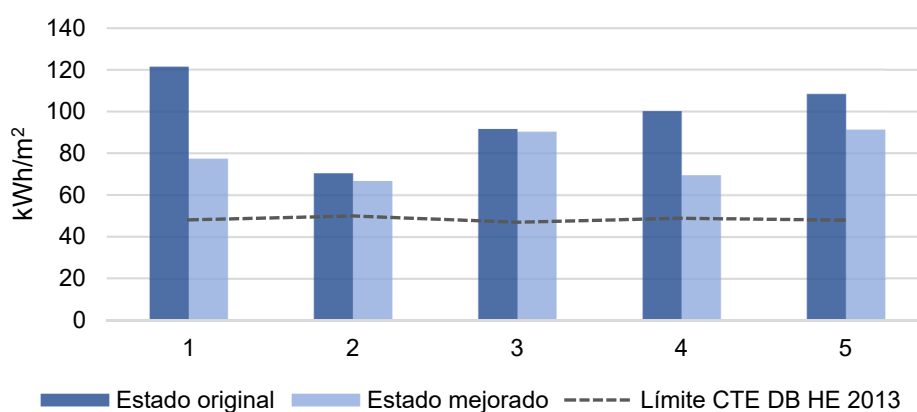


Fig. 7. Consumo de energía primaria no renovable de cada uno de los cinco edificios en su estado original y tras la aplicación de las medidas de mejora, comparado con el límite establecido en el Código Técnico vigente.



## III.2. Sección 2. Comportamiento energético y condiciones ambientales interiores de viviendas en edificios patrimoniales de ciudades históricas de clima mediterráneo (artículos 2 y 3).

En esta sección se evaluó el comportamiento energético y las condiciones ambientales interiores de cuatro viviendas, en condiciones operacionales y de uso, localizadas en edificios catalogados del sector de planeamiento San Gil-Alameda, al norte del Conjunto Histórico de Sevilla. La evaluación fue desarrollada para las condiciones de verano (artículo 2) y para las de invierno (artículo 3), ambas correspondientes al año 2017 en el que se realizó la campaña de monitorización y recogida de datos.

La metodología empleada incluyó la monitorización de los parámetros físicos más relevantes en el desempeño energético de los edificios, el análisis del comportamiento de los residentes mediante métodos de tipo mixto y la generación y validación de modelos energéticos de simulación dinámica. Se prestó especial atención a la selección de los edificios catalogados objeto de estudio para posibilitar la extrapolación de los resultados al mayor número de casos posibles dentro del Centro Histórico de Sevilla. Este trabajo de selección de edificios se basó en el análisis urbano desarrollado previamente y descrito en la Sección 1 de esta tesis. Se evaluó una vivienda concreta perteneciente a cada edificio, que fue escogida en función de su disponibilidad y su ajuste a los fines de la investigación. La voluntad de los residentes a colaborar fue también un factor crítico. Las inspecciones y entrevistas a los residentes, en las que se recabó información relevante sobre sus hábitos de uso de la energía y la forma en que utilizan los sistemas técnicos disponibles, así como la monitorización de las variables ambientales interiores, suponen una invasión de su intimidad durante un periodo de entre dos y cuatro meses al año.

El área urbana de estudio, el sector de planeamiento San Gil-Alameda, se localiza al norte del Conjunto Histórico de Sevilla (Fig. 8). Es el más densamente poblado de los 27 sectores establecidos en su Plan Especial de Protección. Cuenta con 6,500 habitantes (200 habitantes por hectárea) que residen en 1,221 edificios, el 99.8% del número total de edificios existentes. De acuerdo a la información demográfica disponible, correspondiente al año 2015 [123], el 70% de su población tiene entre 18 y 64 años, el 16% menos de 18 años y el 14% más de 64. No existen datos sobre la composición de los hogares.

El 61% de los edificios de viviendas en San Gil-Alameda están incluidos en el Catálogo de protección (750 de los 1,221), la mayoría bajo los niveles C y D (738 de los 750). Los edificios catalogados C se dividen en ocho categorías de acuerdo con las tipologías históricas reconocidas. En San Gil-Alameda el 66% de los edificios C pertenecen a tres tipologías: *Casa de Pisos* (PI), *Casa Patio* (PA) y *Corral de Vecinos* (CV).

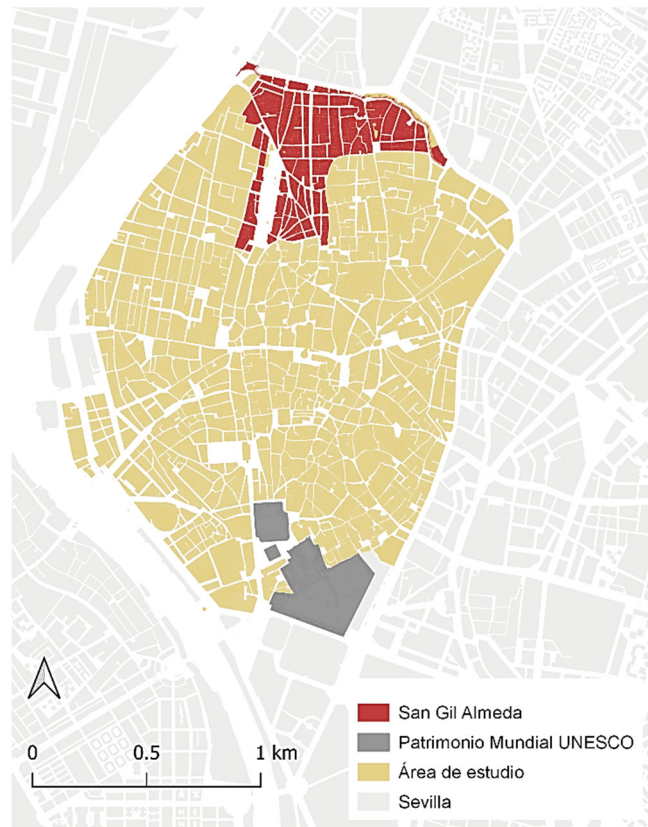


Fig. 8. Mapa del área de estudio (color amarillo) sobre la trama urbana de Sevilla. Se señalan el sector de planeamiento San Gil-Alameda (color rojo) y el conjunto urbano incluido en la Lista Mundial de Patrimonio de la UNESCO (color gris oscuro).

Los edificios catalogados C y D están sujetos a unas normas específicas que definen los elementos arquitectónicos protegidos y determinan el tipo de intervención permitida (Tabla 1). La distribución espacial de los edificios catalogados de San Gil-Alameda se representan en las Fig. 9 y 10 según su grado de protección y tipología histórica respectivamente.

**Tabla 1**

Normas de protección aplicables a edificios catalogados C y D en el Conjunto Histórico de Sevilla

<i>Intervenciones permitidas</i>	Grado de catalogación
Conservación	C, D
Reforma menor y parcial	C, D
Ampliación respetando todas las alineaciones	C, D
Ampliación coplanar respetando regulación de altura	D
<i>Elementos protegidos</i>	
Configuración espacial	C, D
Fachada y primera crujía	C, D
Tipo de cubierta	C, D
Configuración espacial del núcleo entrada-escalera-patio	C
Esquema organizativo de patios de ventilación y luces	C
Materiales y colores originales de la fachada	C, D
Elementos ornamentales de la fachada	C, D
Recercados y cornisas (forma y posición)	C, D
Tamaño, forma y composición de los huecos	C, D
Molduras de puertas y ventanas	C, D
Carpinterías y cerrajería	C, D

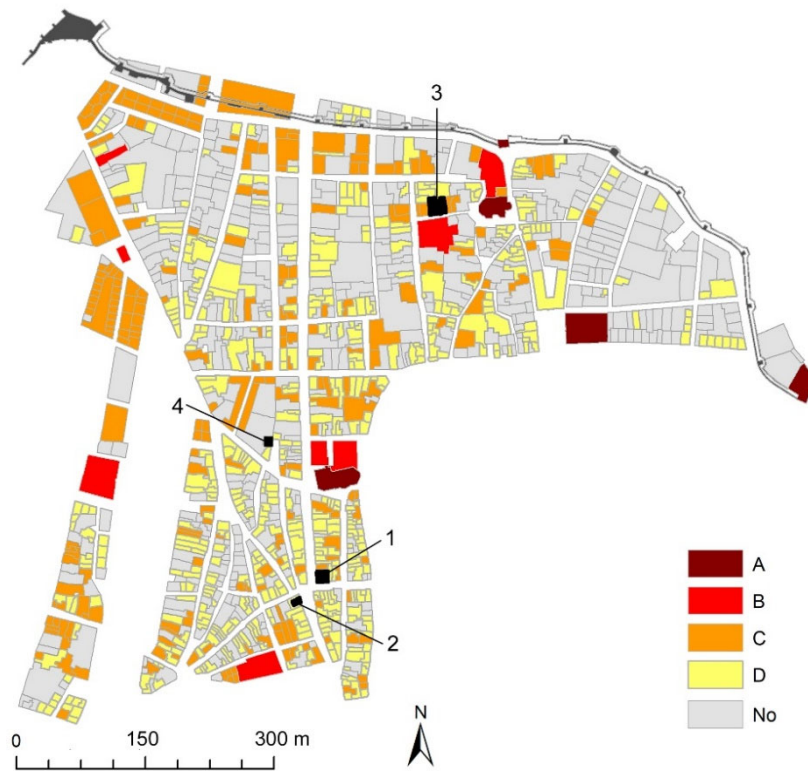


Fig. 9. Distribución espacial de los edificios catalogados en el sector San Gil-Alameda según su grado de protección. Los edificios caso de estudio se señalan numerados en color negro.

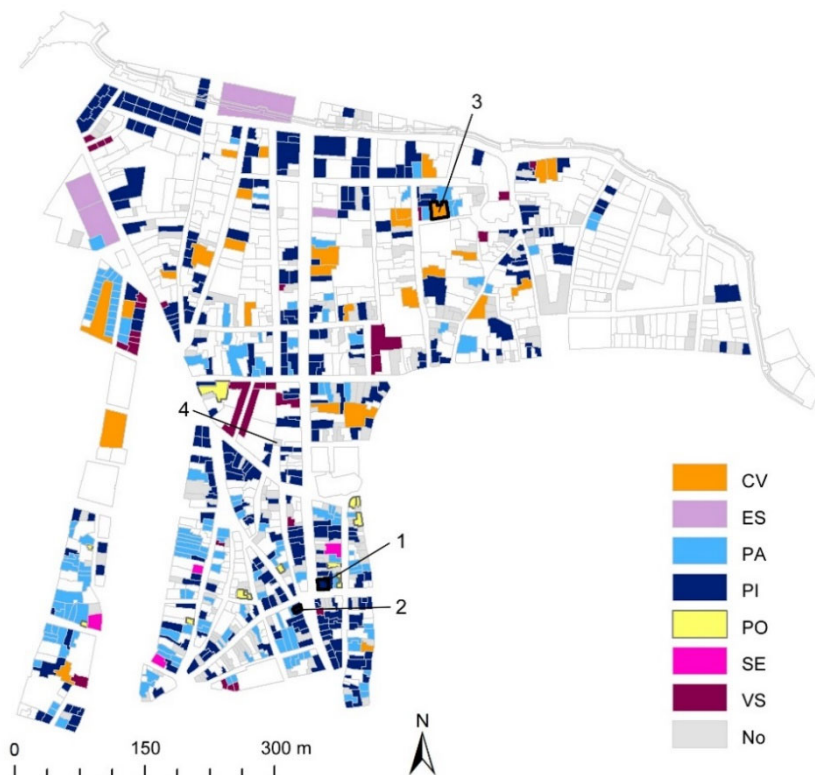


Fig. 10. Distribución espacial de los edificios catalogados C en el sector San Gil-Alameda según su tipología. Los edificios caso de estudio se señalan numerados en color negro. CV: Corral de vecinos, ES: especial, PA: Casa patio, PI: Casa de pisos, PO: Casa popular, SE: Casa señorial, VS: Vivienda singular, No: edificios no catalogados.

En la Fig. 11 se muestra el análisis de la frecuencia de grados de protección y tipologías de los edificios catalogados de San Gil-Alameda.

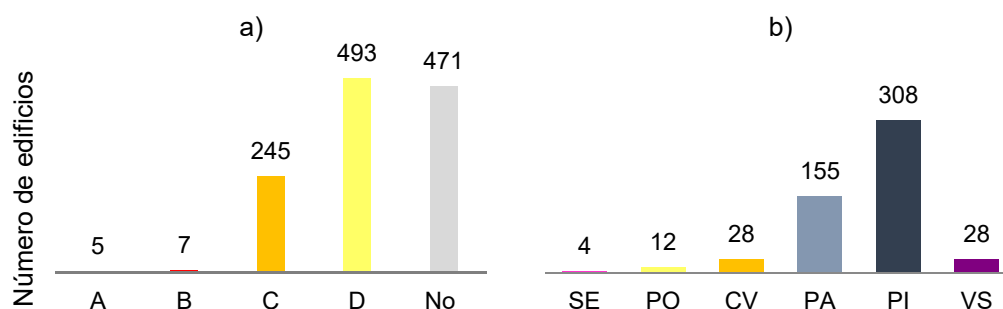


Fig. 11. Frecuencia de grados de catalogación (a) y tipologías (b) en el sector de planeamiento de San Gil-Alameda, en número de edificios. SE: Casa señorial, PO: Casa popular, CV: Corral de vecinos, PA: Casa patio, PI: Casa de pisos, VS: Vivienda singular, No: edificios no catalogados.

Las *Casas de Pisos* son edificios multifamiliares de dos o más plantas (normalmente cuatro) comunicados por una escalera común. La planta baja suele destinarse a locales comerciales y la última suele contar con acceso a una azotea de uso privativo. La fachada principal se alinea con el límite frontal de la parcela que da a la calle, mientras que la fachada trasera da a un patio, generalmente de dimensiones reducidas, para iluminación y ventilación. La *Casa Patio* es una vivienda unifamiliar de dos o tres plantas situada en una parcela cuadrangular. Las habitaciones se organizan en torno a un gran patio en el centro de la parcela. Una galería cubierta en planta primera comunica las estancias, recorriendo el perímetro del patio principal y sombreando las fachadas. Un segundo patio (a veces también un tercero), normalmente más pequeño que el primero, se sitúa en la parte posterior de la parcela para ventilación y la iluminación. El *Corral de Vecinos* es un edificio multifamiliar, que podría considerarse morfológicamente una variante específica popular de la *Casa Patio*. Las viviendas, de una o dos habitaciones y desarrolladas en una única planta, se distribuyen en torno a un gran patio común (a veces pueden ser dos), que les proporciona iluminación y ventilación. El patio común, con frecuencia cuidadosamente ajardinado y mantenido, proporciona iluminación y ventilación a las viviendas individuales, además de ser un espacio para las interacciones sociales. Los *Corrales de Vecinos* de Sevilla constaban tradicionalmente de dos plantas, pero a la mayoría de ellos se les añadió una tercera. El acceso a las viviendas de planta primera y segunda se realiza a través de galerías, que sombrean las fachadas y que también suelen ajardinarse. Los *Corrales de Vecinos* fueron construidos para alojar a población modesta y por ello son más numerosos al norte de la ciudad que al sur, donde representan el 12.5% de los edificios residenciales [124].

Las cuatro viviendas analizadas en esta investigación pertenecen a edificios catalogados bajo las categorías más abundantes en cuanto a nivel de protección y tipología. Los edificios de los Casos 1, 3 y 4 están catalogados como C y el del Caso 2 está catalogado como D. Los Casos 1, 2 y 4 pertenecen a la tipología *Casa de Pisos* y el Caso 3 es un *Corral de Vecinos*. La tipología de *Casa Patio*, muy abundante, no ha podido analizarse en este trabajo porque no se ha

encontrado una muestra disponible. La mayoría de ellas todavía conservan un uso residencial, pero han sido transformadas en hostales, apartamentos turísticos o residencias comunitarias, con perfiles de uso muy específicos alejados del alcance de esta investigación. Todas las viviendas fueron visitadas e inspeccionadas, recabándose información importante sobre las características y el estado de mantenimiento de los sistemas técnicos existentes y los elementos de la envolvente, así como facturas de electricidad del año en curso y dos años precedentes. Las Figuras 12 y 13 representan fotografías de sus fachadas o espacios principales.



Fig. 12. Vistas exteriores de los edificios analizados. A la izquierda, imagen del Caso 1 y a la derecha, del Caso 2.



a)

b)

c)

Fig. 13. Vistas exteriores del Caso 3 (a, fachada principal y b, patio interior) y del Caso 4 (c).

La vivienda del **Caso 1** es un apartamento situado en el primer piso de un edificio de seis plantas construido en 1923 (Fig. 12, izquierda). Fue diseñado en el estilo regionalista sevillano característico de principios del siglo XX por el conocido arquitecto local José Espiau y Muñoz y fue reformado por su hijo Ricardo Espiau Suárez de la Viesca en 1967 [125]. Su superficie útil es de 40.5 m<sup>2</sup> y consta de vestíbulo, salón, cocina, baño y dormitorio. El salón y el dormitorio dan a la fachada principal, orientada al sur. La cocina tiene acceso a luz natural y ventilación a través de una ventana que abre a un pequeño patio interior (Fig. 14). El apartamento fue renovado por última vez en 2004. Además de la sustitución completa de sus instalaciones, se colocaron nuevas carpinterías de madera y acristalamiento doble en las ventanas de la fachada, además de contraventanas interiores opacas, también de madera. Se implementó un sistema mecánico de acondicionamiento de aire por conductos, con salidas al salón y al dormitorio en funcionamiento simultáneo.

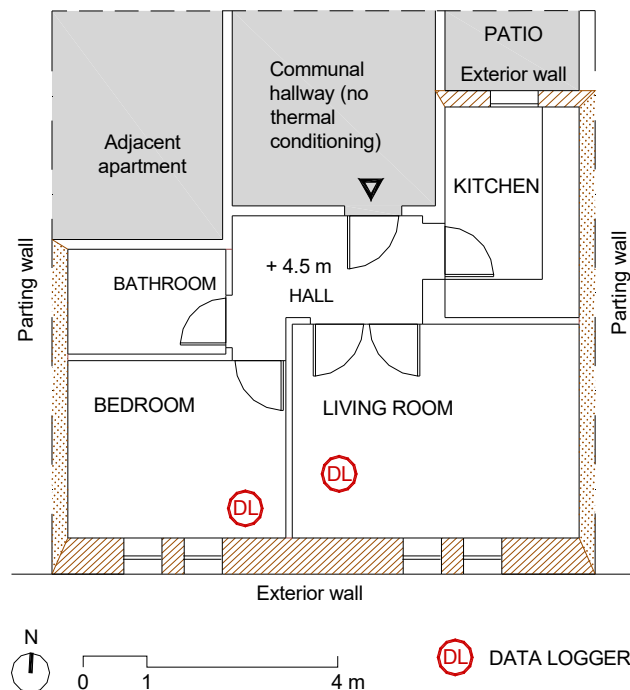


Fig. 14. Planta de la vivienda del Caso 1. La posición de los dos sensores utilizados en la monitorización aparece indicada en color rojo.

La vivienda del **Caso 2** es un apartamento dúplex con fachada orientada al este dentro de una *Casa de Pisos* construida en 1940 (Fig. 12, derecha). Su segunda planta es la más alta del edificio y da acceso a una terraza de uso privado. Tiene una superficie útil de 64.65 m<sup>2</sup> y fue renovada por última vez en 1960 bajo criterios de baja calidad. El patio de ventilación se cubrió con placas de polimetilmetacrilato translúcido, formando un nuevo espacio interior que se cierra verticalmente con un panel sándwich de 70 mm en la parte superior (Fig. 15). Más recientemente, el gran ventanal de la fachada se sustituyó por una de aluminio con doble acristalamiento sin rotura de puente térmico. Ni la cubierta inclinada a dos aguas, ni la cubierta plana de la terraza

se aislaron térmicamente. El dormitorio monitorizado, en el primer piso, se utiliza tanto para dormir (en las noches más calurosas del verano) como para trabajar. Puesto que el patio de ventilación fue cerrado, este dormitorio no tiene ventanas al exterior, imposibilitando la ventilación natural cruzada. Como es habitual en el sur de España, la vivienda únicamente dispone de sistemas de acondicionamiento térmico local: una bomba de calor, que sólo funciona en modo refrigeración, con salida de aire al salón y unidad exterior situada en la terraza, y radiadores eléctricos portátiles en el resto de las habitaciones.

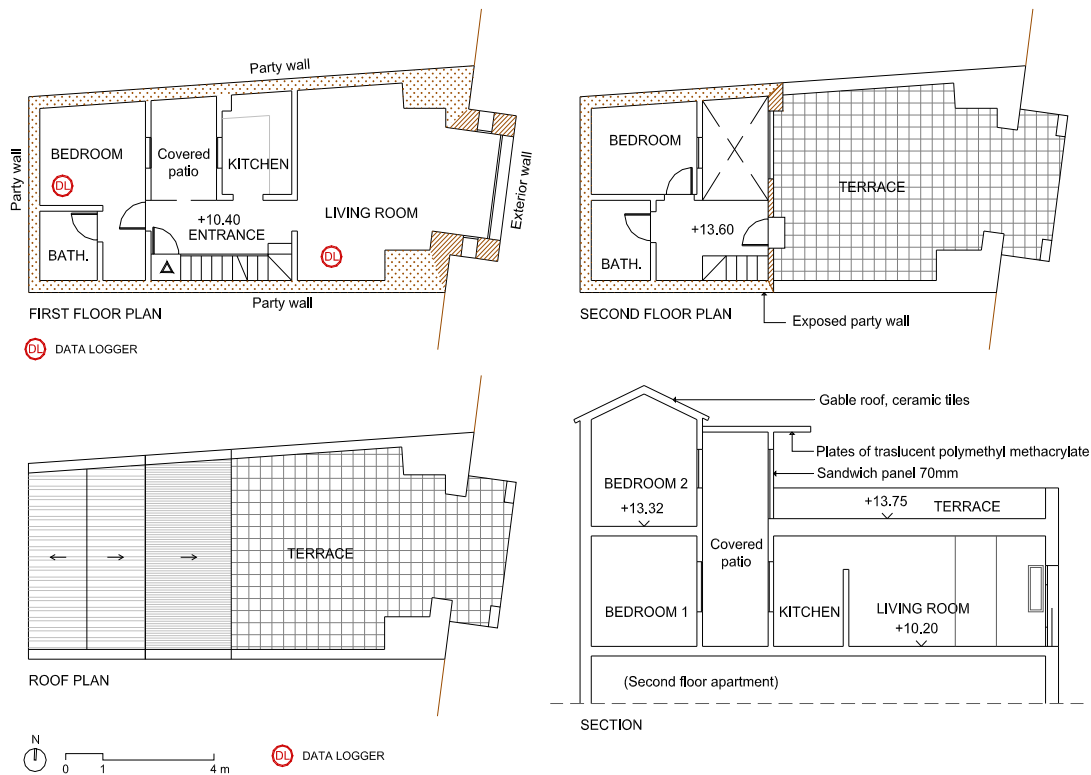


Fig. 15. Plantas y sección de la vivienda del Caso 2. La posición de los dos sensores utilizados en la monitorización aparece indicada en color rojo.

La vivienda del **Caso 3** es un apartamento de una única planta situado en el último piso de un Corral de Vecinos construido a finales del siglo XVIII (Fig. 13a y 13b). Tiene una superficie útil de 35.2 m<sup>2</sup> que contiene una sala de estar y cocina en el mismo volumen, un dormitorio y un baño. El cuarto de baño tiene ventilación e iluminación naturales a través de una pequeña ventana que da a un pequeño patio interior de manzana (Figs. 16 y 17). La última reforma fue realizada en 1992 e incluyó la sustitución completa de las instalaciones y la colocación de nuevas carpinterías de madera en los huecos de fachada, con acristalamiento simple sin rotura de puente térmico y con contraventanas interiores de madera. La cubierta plana nunca ha sido aislada térmicamente. Como en el Caso 2, el apartamento sólo cuenta con sistemas de acondicionamiento térmico local: una bomba de calor reversible, con unidad interior en el salón y unidad exterior en la cubierta, y un radiador eléctrico portátil, generalmente colocado en el dormitorio.

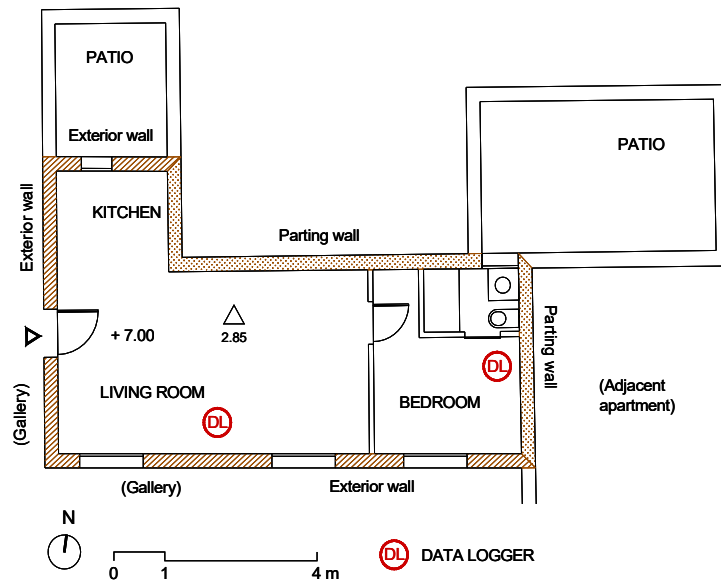


Fig. 16. Planta de la vivienda del Caso 3. La posición de los dos sensores utilizados en la monitorización aparece indicada en color rojo.



Fig. 17. Plantas del edificio Caso 3. La vivienda monitorizada (número 12) está situada en la segunda planta. En color ocre se han sombreado las superficies de uso comunitario: P: patio, T: terraza, FT: terraza sobre cubierta plana.



La vivienda del **Caso 4** es un apartamento dúplex orientado al este dentro de una *Casa de Pisos* de finales del siglo XIX (Fig. 13c). Su segunda planta, que contiene un estudio y una terraza privada, se encuentra en la parte superior del edificio. En la primera planta, donde se desarrolla la mayor parte de la vida diaria, tiene una superficie útil de 73 m<sup>2</sup> y contiene salón y cocina en el mismo espacio, un cuarto de baño y dos dormitorios. Dos pequeños patios facilitan la ventilación natural cruzada (Fig. 18). El apartamento fue renovado recientemente de manera parcial bajo criterios de mayor calidad. Las antiguas ventanas de la fachada fueron sustituidas por otras nuevas de carpintería abatible de madera y aluminio, con rotura de puente térmico, y acristalamiento doble aislante. Las persianas exteriores tradicionales, enrollables, de lamas de madera, se conservaron y se instalaron cortinas opacas en el interior. En el resto de los huecos de la vivienda (los de cocina, baño y vestíbulo), se conservaron las carpinterías existentes de aluminio, de apertura deslizante, sin rotura de puente térmico y acristalamiento simple; ninguna de ellas dispone de sistemas de sombreado. La cubierta fue aislada con poliestireno extruido en placas de 80 mm en toda la superficie a excepción del dormitorio de la niña. Para el acondicionamiento térmico se instaló en 2010 un equipo partido aire-aire, por conductos, de bomba de calor reversible de alta eficiencia, con salida simultánea al salón y el dormitorio de la niña. La unidad exterior se situó en la terraza privada. En invierno, el dormitorio de los padres se calentaba con un radiador eléctrico portátil que, en ocasiones, durante el día, se trasladaba a la cocina. Para el verano, el dormitorio de los padres no contaba con sistema mecánico de refrigeración.

La Tabla 2 ofrece un resumen de la localización, fecha de construcción y otros datos generales relevantes sobre los edificios y las viviendas.

Como señala Guerra-Santín [126], dos de los factores con mayor influencia en el uso de la energía en los edificios residenciales son la composición del hogar y la edad. Por eso, la presencia o ausencia de niños y personas mayores juega un papel especialmente relevante. Debido a la falta de datos estadísticos sobre la composición de los hogares de San Gil-Alameda, mencionada anteriormente, este factor demográfico no ha podido considerarse directamente en esta investigación. No obstante, a partir de la distribución poblacional por tres grandes tramos de edad antes descrita, se puede deducir una baja presencia de niños y ancianos en la mayoría de las viviendas del sector de estudio. En este sentido, la composición de los hogares seleccionados garantiza también la representatividad demográfica de los perfiles de uso estudiados en esta investigación: los Casos 1 y 3 están ocupados por personas de edad comprendida entre 30 y 40 años que viven solas; el Caso 2 por una pareja de alrededor de 40 años sin hijos; y el Caso 3 por una pareja con una niña de 7 años.

Para cada una de las viviendas se realizó una doble evaluación. La primera se refirió al desempeño energético; se realizó mediante la construcción, validación y análisis de resultados de los correspondientes modelos de simulación dinámica. La segunda evaluó las condiciones ambientales interiores mediante el análisis de los datos horarios obtenidos en la monitorización

de temperatura de aire, concentración de CO<sub>2</sub> y humedad relativa interiores, en el salón y un dormitorio de cada vivienda, tanto en verano como en invierno.

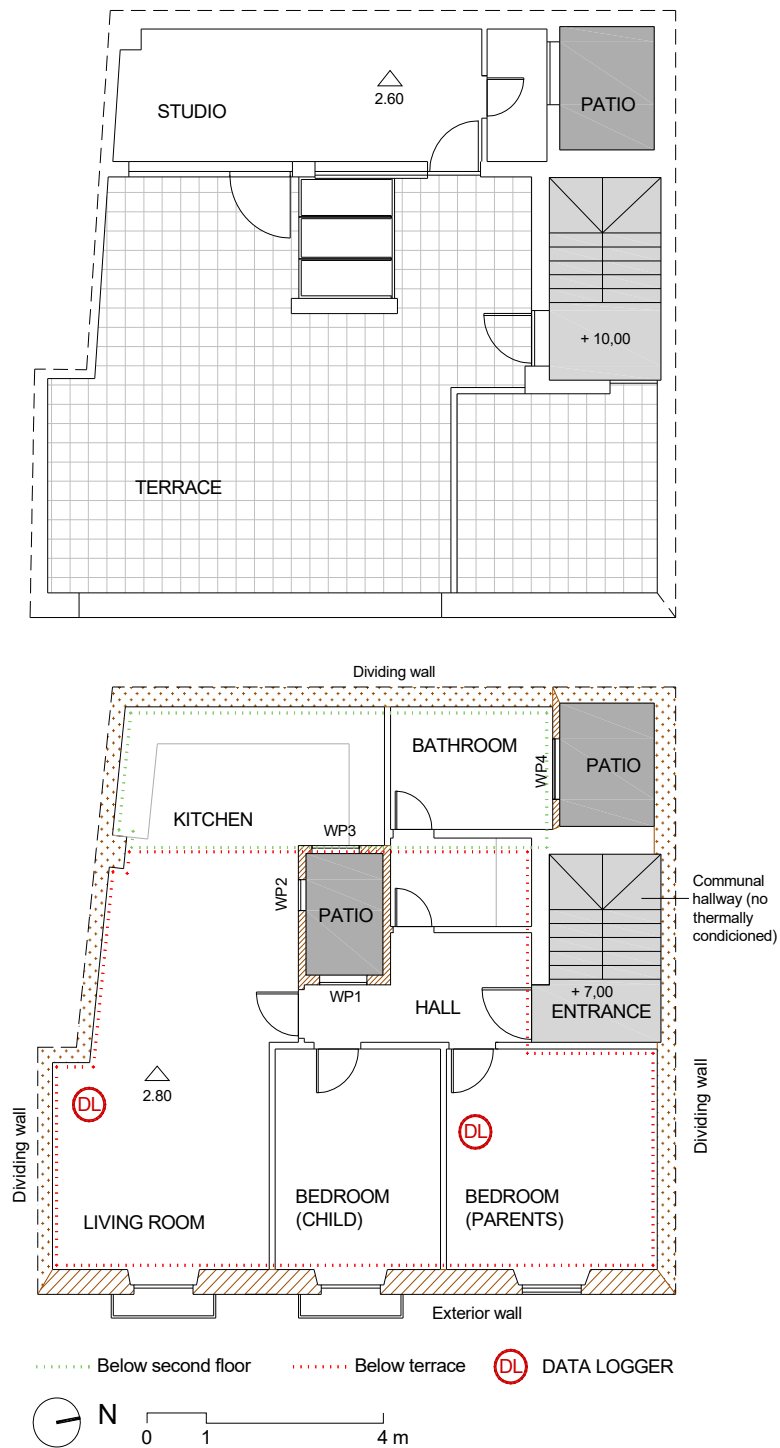


Fig. 18. Plantas de la vivienda del Caso 4. La posición de los dos sensores utilizados en la monitorización aparece indicada en color rojo.

**Tabla 2**

Características generales de los edificios caso de estudio

		<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>	<b>Caso 3</b>	<b>Caso 4</b>
Localización		Cruz Verde 1	Feria 53	Sagunto 3	Peris Mencheta 20
Criterios de selección	Tipología histórica	Casa de Pisos	Casa de Pisos	Corral de Vecinos	Casa de Pisos
	Nivel catalogación	C	D	C	C
	Perfil de uso	Profesional/ jubilado viviendo sola/o	Dos adultos trabajadores sin hijos	Adulta trabajadora viviendo sola	Dos adultos trabajadores con una hija
Antigüedad	Fecha de construcción	1923	1940	Siglo XVIII	Siglo XVIII
	Fecha de reforma	1967, 2004	1960	1992	2010
Geometría	Número de plantas del edificio (*)	PB+4+A	PB+3+A	2+A	3+A
	Planta que ocupa la vivienda en el edificio	1 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	A (*)	3 <sup>a</sup>
	Orientación solar de fachada principal	Sur	Este	Sur	Este
	Superficie útil de vivienda (m <sup>2</sup> )	41	65	35	73
	Compacidad (V/A) (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ) (**)	3.8	3.3	1.3	1.7
Energía	Suministro	Red pública de electricidad			
	Consumo medio anual (kWh)	2,452	5,375	1,327	4,044
	Porcentaje de consumo en invierno (ene, feb, nov, dic)	32%	54%	35%	40%
	Porcentaje de consumo en verano (jun, jul, ago, sep)	39%	27%	33%	30%

(\*) PB: planta baja (comercial), A: Ático

(\*\*) Relación entre volumen encerrado por la envolvente térmica (V) de la vivienda y la suma de las superficies de intercambio térmico de dicha envolvente ( $A = \sum A_i$ ).

### III. 2.1. Evaluación del comportamiento energético.

Los parámetros que determinan el comportamiento energético de un edificio o parte de él son muy numerosos, de naturaleza diversa, variables en el tiempo e interdependientes, haciendo el análisis muy complejo. Pueden agruparse en cinco grandes categorías: *clima*, que se refiere a las condiciones meteorológicas del lugar concreto; *forma*, a los factores geométricos; *construcción*, a los materiales y sistemas constructivos y su estado de conservación; *equipamiento*, a las características técnicas de los sistemas mecánicos y sus condiciones de funcionamiento; y *programa*, que se refiere al comportamiento humano.

Una herramienta de simulación reproduce el comportamiento energético real de un determinado edificio o espacio. Lo hará de manera más rigurosa cuanto mayor sea su capacidad de cálculo y la precisión de la información de entrada de estos cinco parámetros y sus correspondientes sub parámetros. Por ello, para el cumplimiento de los objetivos de esta investigación, se recurrió a la herramienta de simulación dinámica *Design Builder®*, que utiliza el motor de cálculo *Energy Plus®* del Departamento de Energía de Estados Unidos [127], de aceptación generalizada por la comunidad científica. Esta herramienta es capaz de modelar las condiciones interiores y exteriores de un edificio o espacio en periodos horarios de manera dinámica, admite la introducción de la toda información necesaria a un nivel muy preciso y permite considerar el efecto del viento a escala urbana, así como el sombreado producido por los edificios colindantes. En los modelos construidos, el salón (Lr) y el dormitorio (Br) principal de cada vivienda fueron modelados como zonas térmicas diferentes, con perfiles de uso y ocupación específicos. El contacto con las viviendas colindantes fue considerado adiabático. En el contacto con los espacios comunes del edificio o con espacios de uso diferente al de vivienda sí se consideró la transferencia de calor.

En cuanto a los datos de entrada del modelo, con el fin de dotarle de robustez y de fiabilidad a sus resultados, en esta investigación se recurrió al empleo de un enfoque metodológico mixto. El *Método Mixto* propuesto [128], [129] integra los factores cuantitativos y los cualitativos implicados en el desempeño energético de los espacios para comprender de forma pragmática los aspectos técnicos y sociales de las prácticas humanas relacionadas con el uso de la energía en las viviendas. Este método es especialmente indicado para la generación de perfiles de uso ajustados a la realidad. El comportamiento humano ejerce un impacto significativo en el comportamiento energético de los edificios y su relevancia es ya globalmente reconocida por la comunidad científica internacional [113], [130]. Por ello, su definición en los modelos de simulación, que ha venido haciéndose hasta ahora de una manera excesivamente simplificada, es objeto actualmente de una profunda revisión [131], [132]. Esta simplificación es debida a la naturaleza estocástica, diversa, compleja e interdisciplinaria del comportamiento humano, y contribuye enormemente a las diferencias registradas entre los resultados obtenidos mediante simulación y los realmente medidos, conocido como efecto *prebound* [133]. Para evitar esta desviación, en esta investigación se recabó información cuantitativa, mediante una campaña de monitorización realizada durante dos meses de verano y dos meses de invierno en dos espacios

de cada vivienda, y también información cualitativa, referente al comportamiento de los residentes en relación al uso de la energía, obtenida mediante encuestas y entrevistas estructuradas realizadas al largo de toda la campaña y que sirvieron para validar los datos obtenidos mediante la monitorización. Ésta fue desarrollada a lo largo del año 2017 e incluyó la recopilación de datos climatológicos horarios de las dos estaciones de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) [134] existentes en Sevilla.

En las Tablas 3 y 4 se resumen los métodos empleados para la recopilación de la información necesaria para las evaluaciones realizadas, los parámetros analizados, el equipamiento técnico empleado, los datos obtenidos (unidades, rango) y su aplicación a la investigación.

**Tabla 3**

Resumen del procedimiento de recopilación de información sobre clima, forma y construcción y su aplicación.

	Método/periodo	Equipamiento	Datos obtenidos	Rango/Precisión	Aplicación
CLIMA	Monitorización continua / 2017	Estaciones meteorológicas AEMET, intervalos de 1 minuto	OAT (°C)	De -30 °C a 70 °C / ±0.1 °C	Modelo de simulación
			ORH (%)	0-100% / ±3%	
			Velocidad de viento (km/h) y dirección (°)	0-50 m/s / ±1 m/s a <5 m/s, 360°	
	Mediciones puntuales junto a edificios / 2017	Thermohygrometer PCE-444	OAT (°C)	De -20 °C a 70 °C / ±1 °C	
ORH (%)			0-100% / ±3.0 % (45-75%), ±4.5 % (<45%, >75%)		
FORMA	Base de datos abiertos del Catastro [116]		Planos de parcela, de edificios y de viviendas		Modelo de simulación
	Levantamiento de planos in-situ /2017		Superficies útiles, alturas libres interiores, localización de huecos y sus dimensiones		
CONSTRUCCIÓN	Inspección y toma de medidas in situ. Literatura científica y documentos de referencia /2017		Transmitancia térmica (U) de muros, cubiertas y ventanas (W/m <sup>2</sup> K)		Modelo de simulación
	Inspección visual de habitaciones / 2017		Estado de conservación de cubiertas, muros, suelos, ventanas, persianas, conductos de ventilación y fontanería		
	Test de estanqueidad de la envolvente / Otoño y primavera de 2017	Blower Door de acuerdo con EN-13829 [135]	Tasa de renovación de aire a 50 Pa (n <sub>50</sub> ) (h <sup>-1</sup> )		

**Tabla 4**

Resumen del procedimiento de recopilación de información sobre equipamiento y programa y su aplicación.

	Método/ Periodo	Equipamiento	Datos obtenidos	Rango/ Precisión	Aplicación	
<b>EQUIPAMIENTO</b>	Inspección visual / 2017		Características técnicas de los sistemas de climatización y electrodomésticos: tipo, marca y modelo, potencia eléctrica de entrada, eficiencia (EER y COP)		Modelo de simulación	
<b>PROGRAMA</b>	Método Mixto [128] / (1) julio, agosto y diciembre 2017, enero 2018 / (2) A lo largo del año 2017	Sensores WÖHLER CDL 210 (2 por vivienda en Lr y Br) midiendo cada 30 minutos	Concentración interior de CO <sub>2</sub> (ppm)	0-9000 ppm / 50 ppm	Definición de horario de ocupación, ciclos de ventilación natural y evaluación IAQ	Definición del perfil de uso a introducir en modelo energético
			IRH (%)	De 5% a 95% / ±5%	Definición de ciclos de ventilación natural y evaluación IAQ	
			IAT (°C)	De -10 °C a 60 °C / ±0.6 °C	Deducción de ciclos de ventilación natural, de calefacción y refrigeración, evaluación de confort térmico y ajuste del modelo de simulación	

Sevilla está situada en el suroeste de la Península Ibérica, en la zona climática mediterránea, subtipo Csa en el sistema Köppen-Geiger- Pohl [136]. Tiene un clima templado cálido con veranos secos y calurosos e inviernos suaves y lluviosos. Está incluida en la zona B4 de la zonificación climática española, con el valor más alto en la escala de severidad climática en verano. Los datos climáticos históricos de temperaturas de aire exterior (OAT), obtenidos de AEMET para el periodo 1981-2010, fueron comparados con los del año 2017, que son los utilizados para las simulaciones energéticas realizadas en esta investigación. Esta comparación, que se resume gráficamente en la Fig. 19, revela valores inusuales de temperaturas exteriores medias diarias en los meses de junio y octubre de 2017. Éstas alcanzaron valores de 28 °C en el primer mes y 24 °C en el segundo, desviándose 3 °C y 4 °C, respectivamente, por encima de las medias históricas (Fig. 19a). Los valores máximos diarios fueron significativamente mayores en 2017 que en el periodo histórico, con un aumento de 7 °C de media para los doce meses (Fig. 19b).

El verano de 2017 fue especialmente caluroso en Sevilla. Durante el 40% de los días de verano, las temperaturas exteriores máximas diarias superaron los 40 °C, punto crítico para activar los protocolos de ola de calor. De hecho, se registraron cinco olas de calor, con temperaturas exteriores mínimas raramente inferiores a 20 °C y máximas de hasta 47.4 °C [137]. En verano

de 2017 las temperaturas exteriores nocturnas fueron muy elevadas, lo que es frecuente en Sevilla, haciendo imposible recurrir a la ventilación natural nocturna para refrescar las viviendas. La Fig. 20 muestra que, del 15 de junio al 15 de septiembre 2017, durante el 49.4% de las horas nocturnas (22PM-8AM) las temperaturas del aire exterior fueron superiores a 26 °C, el límite superior de temperatura de aire interior recomendado para los edificios residenciales de categoría II en la norma europea UNE-EN 16798-1 [138] .

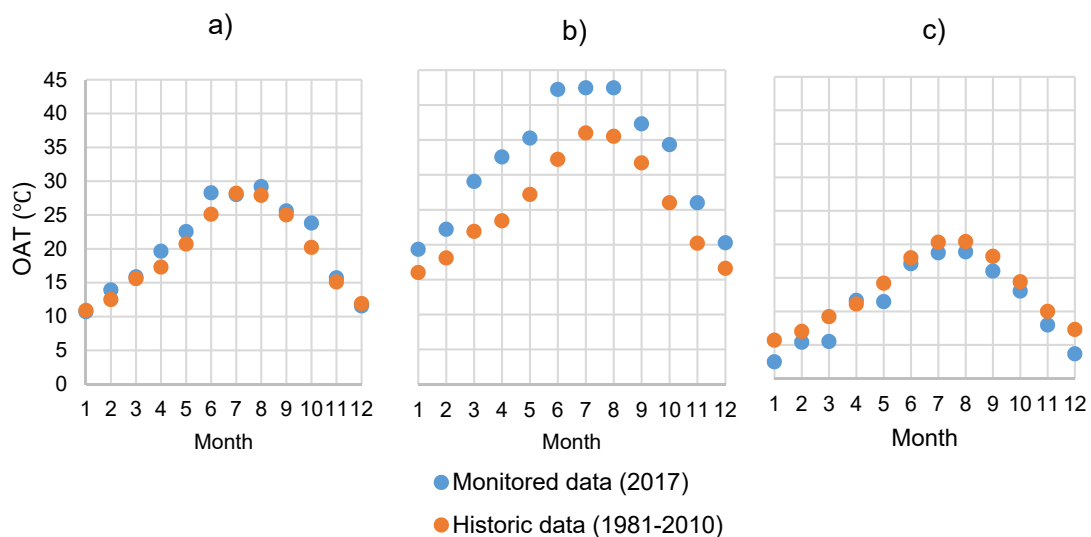


Fig. 19. Gráficos de dispersión que muestran la evolución mensual de los valores de OAT en Sevilla. Los puntos azules corresponden a las temperaturas de aire exterior registradas en 2017 y los puntos naranjas a los datos históricos. Los valores medios se representan en (a), los máximos en (b) y los mínimos en (c).

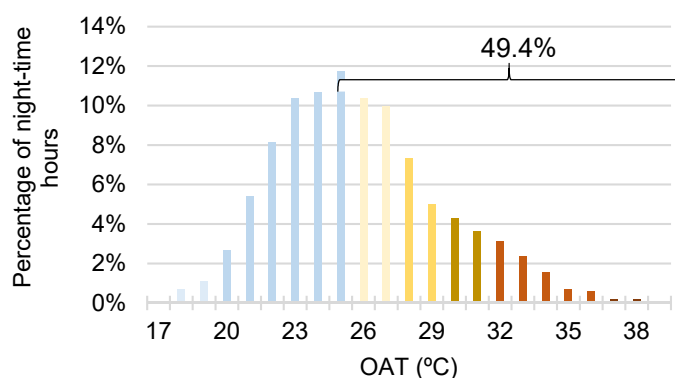


Fig. 20. Distribución de valores horarios de temperatura exterior del aire (OAT) durante las noches del periodo comprendido entre el 15 de junio y el 15 de septiembre de 2017. Las temperaturas inferiores a 26 °C se representan en azul. Por encima de este límite, se representan en colores cálidos.

El escenario climático descrito concuerda con la proyección de la *European Environment Agency* (EEA) de 2017 sobre los impactos del cambio climático en la región europea mediterránea [139], según la cual, en esa zona, la superficie de la tierra sufrirá un calentamiento significativo, de unos

1.5 °C en invierno y unos 2 °C en verano, y una disminución de la precipitación media anual de alrededor del 5% para el periodo 2021-2050, comparado con el periodo 1961-1990. Ello afectará a la frecuencia e intensidad de los fenómenos extremos, como el calor intenso. Las alteraciones más significativas de los patrones climáticos se producirán en los meses de verano y “los periodos cálidos serán más largos, las olas de calor más intensas y frecuentes y los días y noches muy calurosos más numerosos”. En vista de esto, es realista suponer que nuestros resultados, referidos al año 2017, pueden extenderse a otros años en un futuro próximo.

Los datos de antigüedad y geometría de cada edificio fueron obtenidos del Catastro [116]. El levantamiento preciso de la planimetría de cada vivienda se efectuó mediante mediciones in situ. La caracterización constructiva e higrotérmica de las envolventes se realizó mediante la información recabada en la literatura científica existente sobre la arquitectura doméstica sevillana de los siglos XVIII y XIX [140] y en documentos reconocidos con valores estandarizados [119], complementándola con la información recabada en las inspecciones visuales. Éstas permitieron, además, reunir información precisa de los equipos técnicos de refrigeración y calefacción existentes, su tipo, eficiencia y estado de conservación. Para la determinación del valor de la tasa de renovación del aire ( $n_{50}$  en  $h^{-1}$ ), una característica de las envolventes con un impacto significativo sobre la demanda energética de los edificios [141], se realizaron test de presurización y despresurización con *Blower Door*, siguiendo la UNE EN-13829 [135]<sup>2</sup>. Las pruebas fueron realizadas en primavera y otoño de 2017. El equipo fue fijado en las puertas de entrada de cada vivienda y manejado desde el interior. La información sobre las características de los sistemas técnicos se resume en la Tabla 5 y sobre las de las envolventes en la Tabla 6.

**Tabla 5**  
Características de los sistemas técnicos existentes en los casos de estudio

	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>	<b>Caso 3</b>	<b>Caso 4</b>
Ventilación	Natural a través de ventanas			
	Extractor en cocina	-	Extractor en cocina	-
	Ventilador en baño (cegado o no funciona)			
Agua caliente sanitaria	Calentador y acumulador eléctrico			
Refrigeración	Centralizado por conductos EER= 3.25 (salidas a Lr y Br)	Bomba de calor (EER=2.30)	Bomba de calor en Lr (EER=2.60)	Centralizado por conductos EER=3.25 (salidas a Lr y Br)
Calefacción	Centralizado por conductos COP= 2.70 (salidas a Lr y Br)	Convector en dormitorio de planta baja	Bomba de calor en Lr (COP = 2.50)	Centralizado por conductos COP = 4.0 (salidas a Lr y Br)
	Radiador de aceite desplazable (1,800 W, generalmente en Lr)		Radiador aceite desplazable (2,000 W generalmente en Br)	Radiador aceite desplazable (2,000 W en cocina o en Br)

<sup>2</sup> Esta norma ha sido recientemente sustituida por la UNE-EN ISO 9972:2019. *Prestaciones térmicas de los edificios. Determinación de la permeabilidad al aire de los edificios. Método de presurización con ventilador.*



**Tabla 6**

Caracterización de la envolvente de los casos de estudio

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
<b>Muros exteriores fachadas</b>				
Espesor (cm) / U (W/m <sup>2</sup> K)	60/0.60	40/1.56	27/2.26	40/1.40
Composición (ext-int)	Ladrillo macizo visto (24 cm) Cámara de aire (5 cm) Ladrillo macizo (24 cm) Mortero y pintura (2cm) XPS (3 cm) y yeso (1.5 cm)	Ladrillo macizo visto (24 cm) Cámara de aire (2 cm) Ladrillo macizo (12 cm) Mortero y pintura (2cm)	Mortero y pintura (2 cm) Ladrillo macizo (12 cm) Cámara de aire (3 cm) Ladrillo perforado (8 cm) Mortero y pintura (2 cm)	Mortero y pintura (2 cm) Ladrillo macizo (24 cm) Ladrillo macizo (12 cm) Mortero y pintura (2 cm)
<b>Muros cerramiento patios</b>				
Espesor (cm) / U (W/m <sup>2</sup> K)	27/1.14	-	14/2.26	14/2.87
<b>Ventanas</b>				
U ventanas (Fachada/Patio) (W/m <sup>2</sup> K)	2.96/5.80	3.76/5.80	6.96/5.80	2.56/5.80
U vidrio (W/m <sup>2</sup> K) (Fachada/Patio)	3.23/5.78	3.23/5.78	5.78/5,78	1.40/5.78
U carpintería (W/m <sup>2</sup> K) (Fachada/Patio)	1.90/5.88	5.88/5.88	1.90/5.88	1.8/5.88
Tipo carpintería fachada (todas abatibles) (**)	Madera. Sin RPT	Aluminio. Sin RPT	Madera. Sin RPT	Madera + aluminio. RPT
Tipo de vidrio en fachada	Doble 3/6/3 mm (aire)	Doble 3/6/3 mm (aire)	Simple 6 mm	Doble 4+4SC/12/6+6SC (aire)
Tipo de vidrio en patios	Simple 6 mm	Simple 6 mm	Simple 6 mm	Simple 4 mm
Sistema de sombreado (Fachada/Patio)	Contraventanas madera opacas por interior / Persianas enrollables aluminio	Contraventanas aluminio opacas (int) /-	Contraventanas madera opacas (int) / -	Persiana lamas madera enrollables (ext.); cortinas opacas (int.)/-
<b>Cubiertas</b>				
U (W/m <sup>2</sup> K)	-	3.1/2.63	3.10	0.37/2.60 (***)
Tipo de cubierta	Cubierta plana transitable	Terraza plana/tejado inclinado tejas cerámicas	Cubierta plana transitable	Cubierta plana transitable
Composición de cubierta (ext-int)	Baldosa (doble capa con mortero) Mortero Tela asfáltica Forjado	Teja cerámica Mortero Tela asfáltica Mortero Estructura acero	Baldosa (doble capa con mortero) Mortero Tela asfáltica Forjado	Baldosa (doble capa con mortero) Mortero (4 cm) Poliestireno extruido (8 cm) Mortero (2 cm) Doble tela asfáltica Mortero (1 cm) Hormigón aligerado (5 cm) + barrera vapor Forjado
<b>n<sub>50</sub> (h<sup>-1</sup>)</b>	15.71	7.14	7.71	3.76

(\*\*) Todas las carpinterías de muros de patio son deslizantes de aluminio sin RPT.

(\*\*\*) Parte de la cubierta plana con aislamiento térmico / sin aislamiento térmico.

Utilizando sensores WÖHLER CDL 2100, se monitorizaron IAT en grados centígrados (°C), IRH en porcentaje (%) y concentración de CO<sub>2</sub> en partes por millón (ppm), en dos habitaciones de cada vivienda (salón, Lr, y dormitorio principal, Br), durante dos meses de verano y dos de invierno. La información recabada se resume en las Tablas 7 (verano) y 8 (invierno), donde también se indica el porcentaje de horas de funcionamiento de los sistemas de climatización con respecto al total de horas de ocupación, calculado según el Método Mixto descrito. En la Fig. 21 se muestran gráficamente la evolución horaria de IRH y CO<sub>2</sub> en salón y dormitorio principal de las viviendas durante el periodo representativo de verano.

**Tabla 7**

Valores de los parámetros ambientales monitorizados durante el periodo de verano

<b>Exterior</b>	<b>Caso 1</b>		<b>Caso 2</b>		<b>Caso 3</b>	
Max OAT (°C)	40.2		42.2			
Min OAT (°C)	21.4		18.5			
Max RH (%)	84.0		87.0			
Min RH (%)	21.4		13.0			
<b>Interior</b>	Lr	Br	Lr	Br	Lr	Br
<b>Temperatura (°C)</b>						
Media	27.8	28.2	28.6	29.9	28.6	28.6
Máxima	30.3	31.0	32.6	32.2	32.7	32.2
Mínima	22.3	23.8	23.8	27.8	24.7	25.8
<b>Concentración CO<sub>2</sub> (ppm)</b>						
Media	475	476	493	492	436	455
Máxima	852	718	1035	816	970	1049
Mínima	400	404	372	403	396	406
<b>Humedad relativa (%)</b>						
Media	49	46	46.0	45.0	44.0	47
Máxima	67	76	70	62	65	66
Mínima	29	32	19	26	22	25
Porcentaje de horas ocupadas de uso de la refrigeración mecánica	58%		66%		4%	

**Tabla 8**

Valores de los parámetros ambientales monitorizados durante el periodo de invierno.

<b>Exterior</b>	<b>Caso 1</b>		<b>Caso 2</b>		<b>Caso 3</b>		<b>Caso 4</b>	
Max OAT (°C)	19.1		20.3		19.1		19.1	
Min OAT (°C)	4.2		5.4		4.4		4.4	
Max RH (%)	95		94		94		94	
Min RH (%)	38		46		35		35	
<b>Interior</b>	Lr	Br	Lr	Br	Lr	Br	Lr	Br
<b>Temperatura (°C)</b>								
Media	19.3	19.2	17.5	17.3	14.5	15.2	19.5	19.8
Máxima	22.2	21.5	22.6	22.1	16.3	16.7	23.6	23.3
Mínima	17.5	17.7	13.6	15.5	12.7	13.4	16.7	16.8
<b>Concentración CO<sub>2</sub> (ppm)</b>								
Media	655	669	743	777	649	715	702	782
Máxima	1123	1123	2075	2107	1916	2082	1389	2271
Mínima	419	430	475	519	404	408	397	402
<b>Humedad relativa (%)</b>								
Media	48	51	59	60	57	58	53	53
Máxima	61	63	69	77	90	92	63	64
Mínima	38	37	47	48	36	38	42	36
Porcentaje de horas ocupadas de uso de la calefacción	57%		40%		0%		83%	

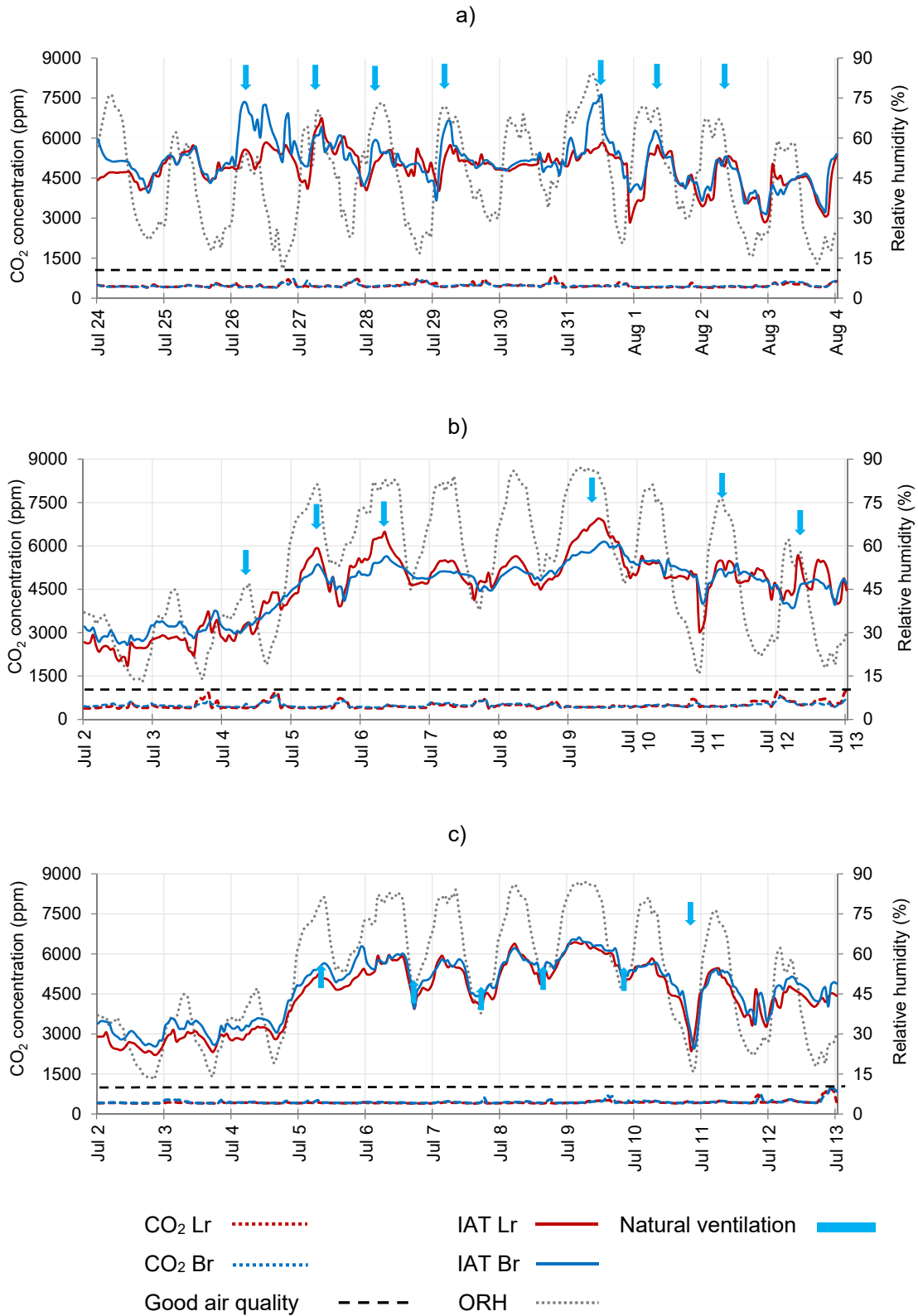


Fig. 21. Condiciones de verano. Evolución horaria de concentración de CO<sub>2</sub> e IRH durante el periodo representativo en los Casos 1(a), Caso 2 (b) y Caso 3 (c). La línea negra de rayas señala el límite superior de calidad de aire. Los ciclos de ventilación natural se señalan en flechas azules.

Las encuestas y entrevistas, realizadas en las propias viviendas en diferentes momentos de la campaña, proporcionaron información cualitativa sobre ocupación (densidad y periodos), hábitos de ventilación natural (cuándo y durante cuánto tiempo se ventila cada habitación), refrigeración y calefacción (tipo de sistema o sistemas utilizados, cuándo se suelen encender y durante cuánto tiempo, temperatura habitual de consigna), rutinas diarias (uso de las habitaciones, hábitos culinarios y de uso de los electrodomésticos) y preferencias personales relacionadas con el confort térmico, incluyendo el nivel preferido de ropa en el interior de las viviendas. Esta información cualitativa, combinada con la cuantitativa, que se extrajo de la monitorización antes descrita, sirvió para definir los perfiles de uso del salón y el dormitorio principal de cada vivienda en condiciones de verano y de invierno.

Se examinó con detalle el conjunto completo de información para conocer las prácticas de ocupación, ventilación natural y funcionamiento de la climatización en tres diferentes escalas de tiempo: (1) el ciclo de monitorización completo (2 meses), para conocer las tendencias generales; (2) un periodo representativo de 11 días, extraído del anterior, incluidos días laborables y los fines de semana; y (3) uno o dos días representativos. Las tasas de concentración de CO<sub>2</sub> medidas en el interior de salones y dormitorios se utilizaron para establecer las horas de ocupación y, en combinación con las tasas de OAT, IAT e IRH, para deducir los periodos de ventilación natural. Los cambios bruscos de IAT registrados se utilizaron para deducir la puesta en marcha y/o apagado de los sistemas de climatización. Cuando en las encuestas se declararon periodos prolongados de ventilación natural en verano, los niveles de concentración interior de CO<sub>2</sub> no se utilizaron directamente para deducir la presencia humana, y el horario de ocupación declarado en la encuesta correspondiente fue adoptado. De esta manera, los ciclos reales de ocupación, ventilación natural y climatización pudieron establecerse con precisión para el periodo representativo de 11 días y después ser utilizados para el análisis de las condiciones ambientales interiores. El análisis de perfil de uso de invierno se representa gráficamente en la Fig. 22 (periodo de 11 días) y en la Fig. 23 (días representativos). En esta última figura se señalan los ciclos de utilización de la calefacción y su relación con la evolución de las temperaturas interiores.

Los resultados del análisis de los perfiles de uso indican que, con mucha frecuencia, la información declarada en las encuestas y entrevistas (cualitativa) difiere de la deducida a través de la monitorización (cuantitativa) (Fig. 24). Los periodos de ocupación declarados por los residentes son generalmente más largos que los registrados realmente. Esta divergencia es más acusada en verano que en invierno. El mismo fenómeno se produce en referencia a la frecuencia y duración de los ciclos de calefacción y refrigeración.

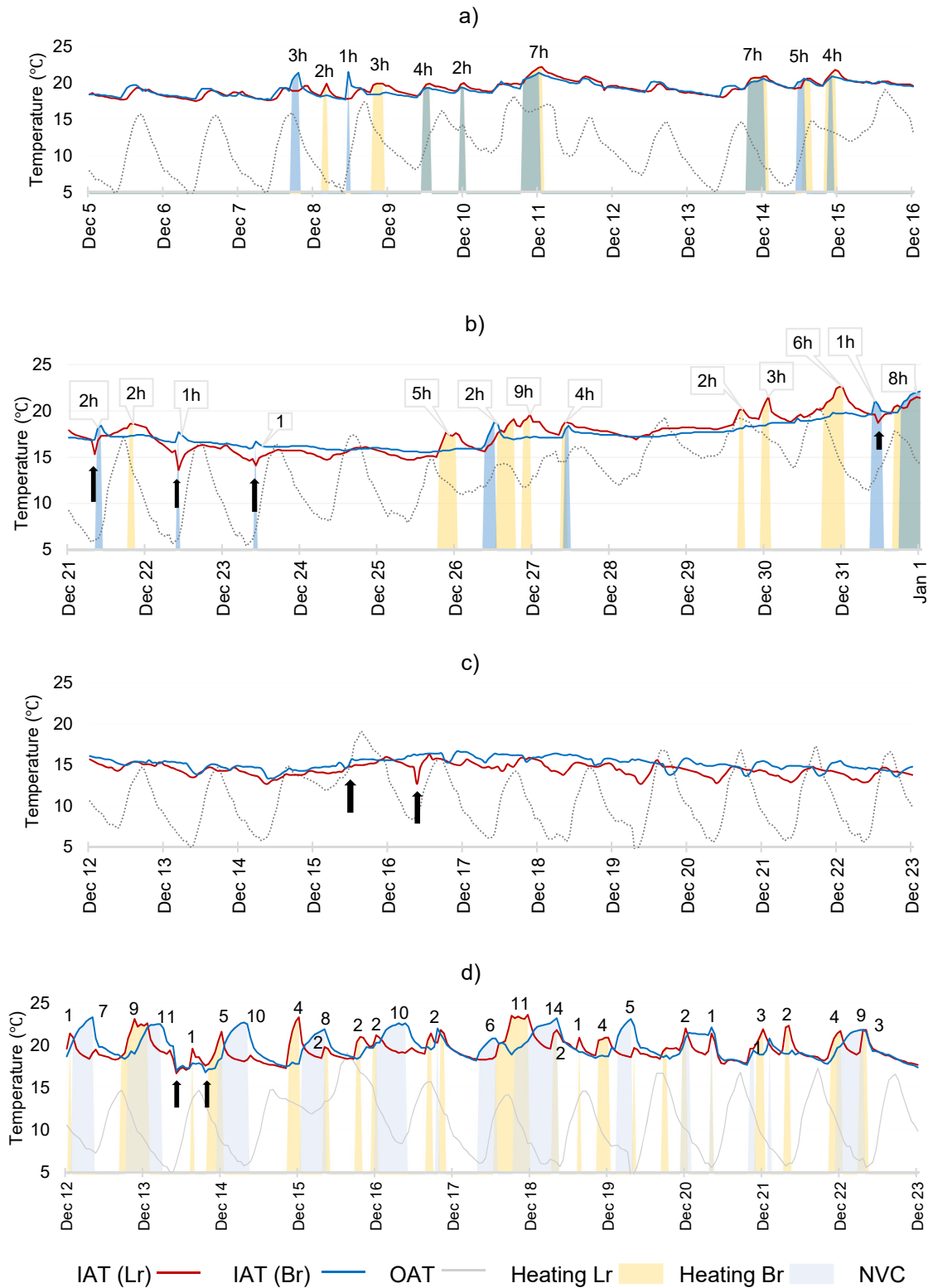


Fig. 22. Evolución horaria de temperaturas interiores en el periodo representativo de invierno en Caso 1 (a), Caso 2 (b), Caso 3 (c) y Caso 4 (d). Los ciclos de calefacción están marcados en colores suaves y su duración indicada en número de horas. Los ciclos de ventilación natural (NVC) se señalan en flechas de color negro.

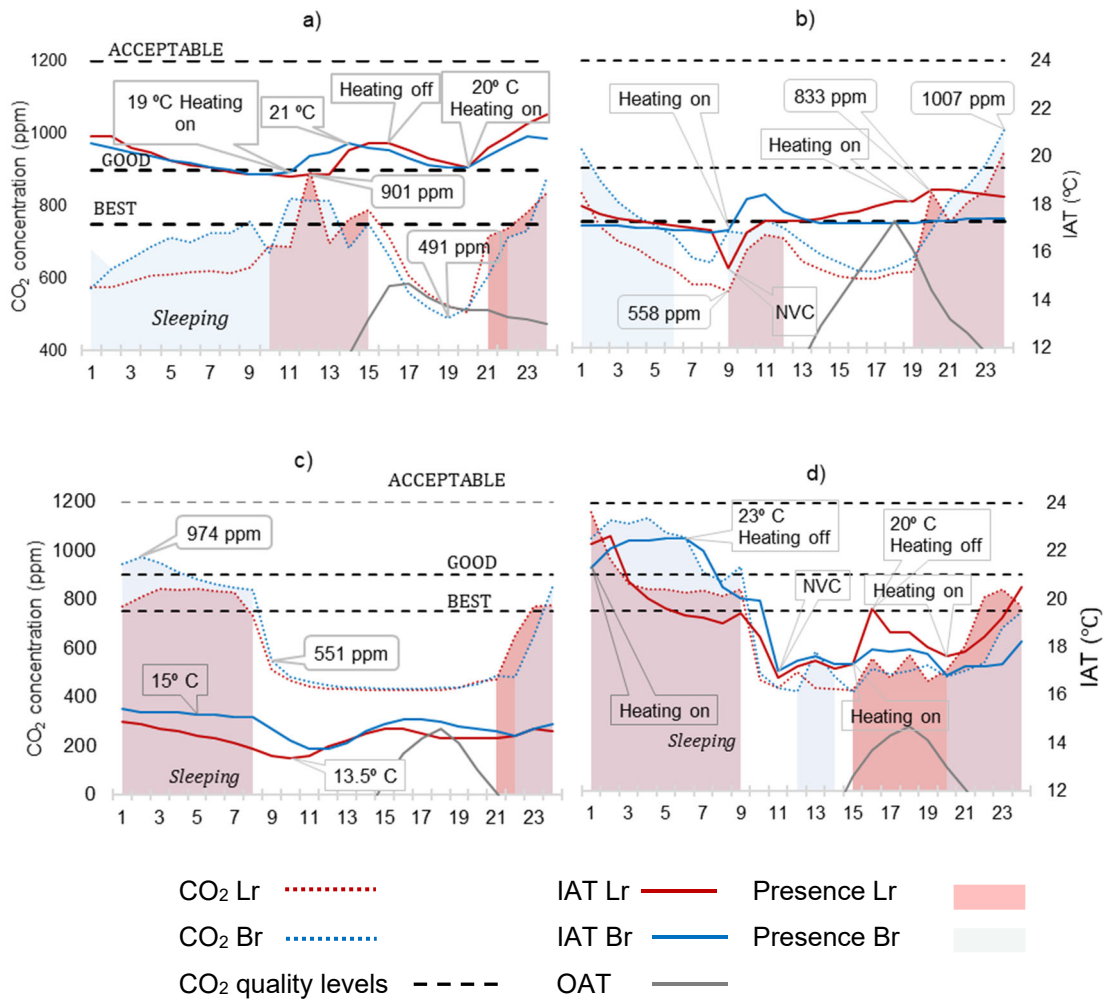


Fig. 23. Perfil de uso en el día representativo de invierno de Caso 1 (a), Caso 2 (b), Caso 3 (c) y Caso 4 (d). Los ciclos de ocupación se marcan en tono rojo suave (salones) y azul suave (dormitorios). Se señala la evolución horaria de OAT y la concentración de CO<sub>2</sub> e IRH en el interior de las habitaciones. Los niveles recomendados de concentración de CO<sub>2</sub> se indican en líneas negras rayadas. Se señalan los ciclos de ventilación natural (NVC).

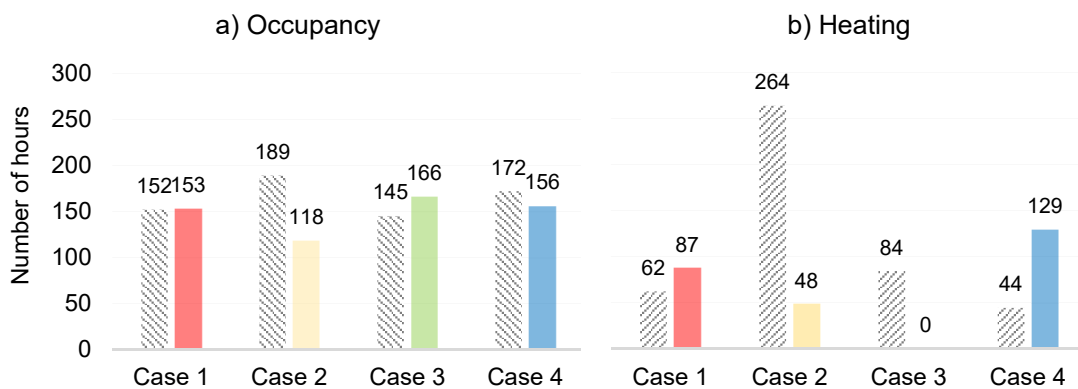


Fig. 24. Divergencia entre la información cualitativa obtenida mediante encuestas (trama de rayas color gris) y la cuantitativa deducida a partir de los datos de monitorización (colores sólidos), en horas, durante el periodo representativo de 11 días de invierno. La ocupación se representa a la izquierda (a) y el uso de la calefacción a la izquierda (b).

Como se deduce de los datos de monitorización presentados en las Fig. 22 y 23 y en las Tablas 7 y 8, el uso de los sistemas de climatización está significativamente relacionado con el mantenimiento de unas condiciones de confort térmico adecuadas. En el Caso 3, casi siempre en libre evolución, se alcanzan temperaturas cercanas a los 33 °C en verano y las medias en invierno rondan los 15 °C. Cuando se hace un uso continuado e intenso de la calefacción, como en los Casos 1 y 4, las temperaturas interiores rondan los 19 °C. En verano, la temperatura interior media en el Caso 1 es excesivamente alta a pesar del uso intenso de la refrigeración (unos 28 °C). En el Caso 2, donde los sistemas técnicos existentes son muy ineficientes y están muy mal mantenidos, a pesar de su uso extendido, las temperaturas interiores medias rondan los 29 °C en verano y los 17 °C en invierno. En cuanto a la concentración de CO<sub>2</sub>, en verano, la ventilación natural frecuente consigue que sus valores medios no alcancen los 500 ppm en ninguno de los casos. En invierno, por el contrario, las tasas registradas varían entre 650-800 ppm, y son especialmente altos en los dormitorios, debido a la falta de ventilación para evitar pérdidas de calor. Las tasas medias de humedad relativa interior se mantienen en verano alrededor del 45%, dentro del intervalo recomendado en la normativa nacional [142], pero en invierno alcanzan valores más elevados en todos los casos.

Una vez definidos los perfiles de usuario de cada vivienda en verano e invierno, e introducida el resto de la información de entrada mediante el Método Mixto descrito, los modelos energéticos de cada vivienda proporcionaron el cálculo horario de los principales parámetros ambientales interiores. Con el fin de reducir al máximo las posibles discrepancias entre lo medido y lo simulado, causadas por otros factores diversos no controlados, como las patologías constructivas y/o el uso de los mecanismos de protección solar, los modelos fueron calibrados manualmente. Los valores horarios de IAT obtenidos mediante simulación en las dos habitaciones de cada vivienda fueron comparados gráficamente con los registrados mediante monitorización durante el periodo representativo de 11 días, para ser iterativamente ajustados. Los valores horarios de IAT resultantes de este ajuste manual se validaron estadísticamente siguiendo las directrices de la ASHRAE Guideline [143] que recomienda dos indicadores de error para representar el ajuste de un modelo matemático a la variabilidad de los datos medidos: el Error Medio de Sesgo Medio Normal (NMBE) (Ecuación 1) y el Coeficiente de Variación del Error Cuadrático Medio (CV(RMSE)) (Ecuaciones 2 y 3). El modelo se considera calibrado cuando los valores horarios de NMBE se encuentran dentro del  $\pm 10\%$  y cuando los de CV(RMSE) son inferiores al 30%. El ajuste conseguido mediante la aplicación del método de calibración manual descrito fue notable, tanto en condiciones de verano como de invierno (Figs. 25 y 26).

$$NMBE = \frac{1}{M} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)}{(n-p)} \times 100 (\%) \quad (1)$$

$$CV (RMSE) = \frac{1}{M} \cdot RMSE \times 100 (\%) \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{n-p}} \quad (3)$$

donde:

*M<sub>i</sub>* es el dato medido en el instante *n*,

*S<sub>i</sub>* es el dato simulado en el instante *n*,

*M* es la media de los datos medidos,

*n* es el número de registros usados para la calibración,

*p* es el número de parámetros ajustables del modelo, que, a efectos de calibración, se sugiere que sea cero [144]



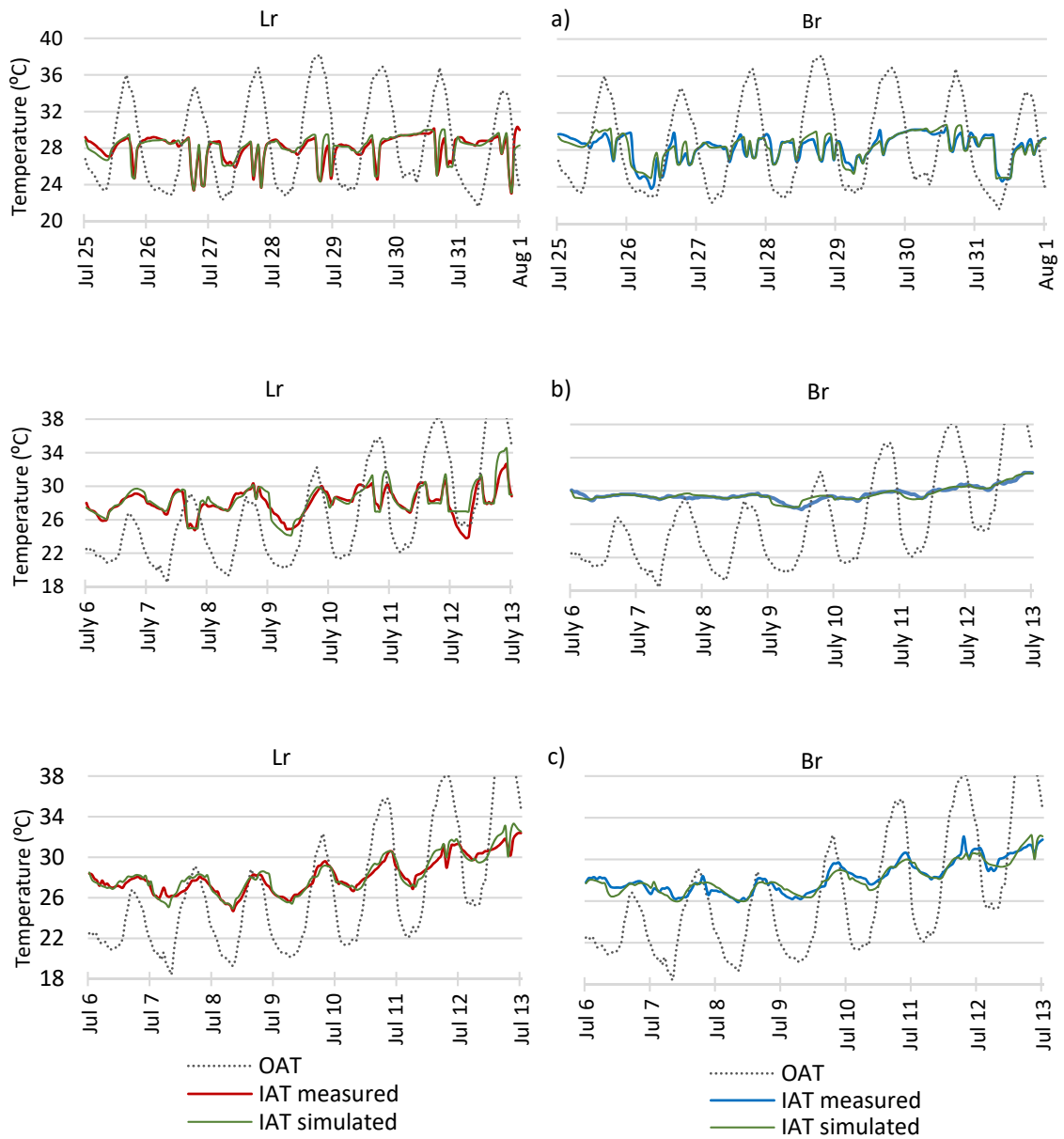


Fig. 25. Calibración gráfica de los modelos de simulación del Caso 1 (a), Caso 2 (b) y Caso 3 (c) en condiciones de verano.

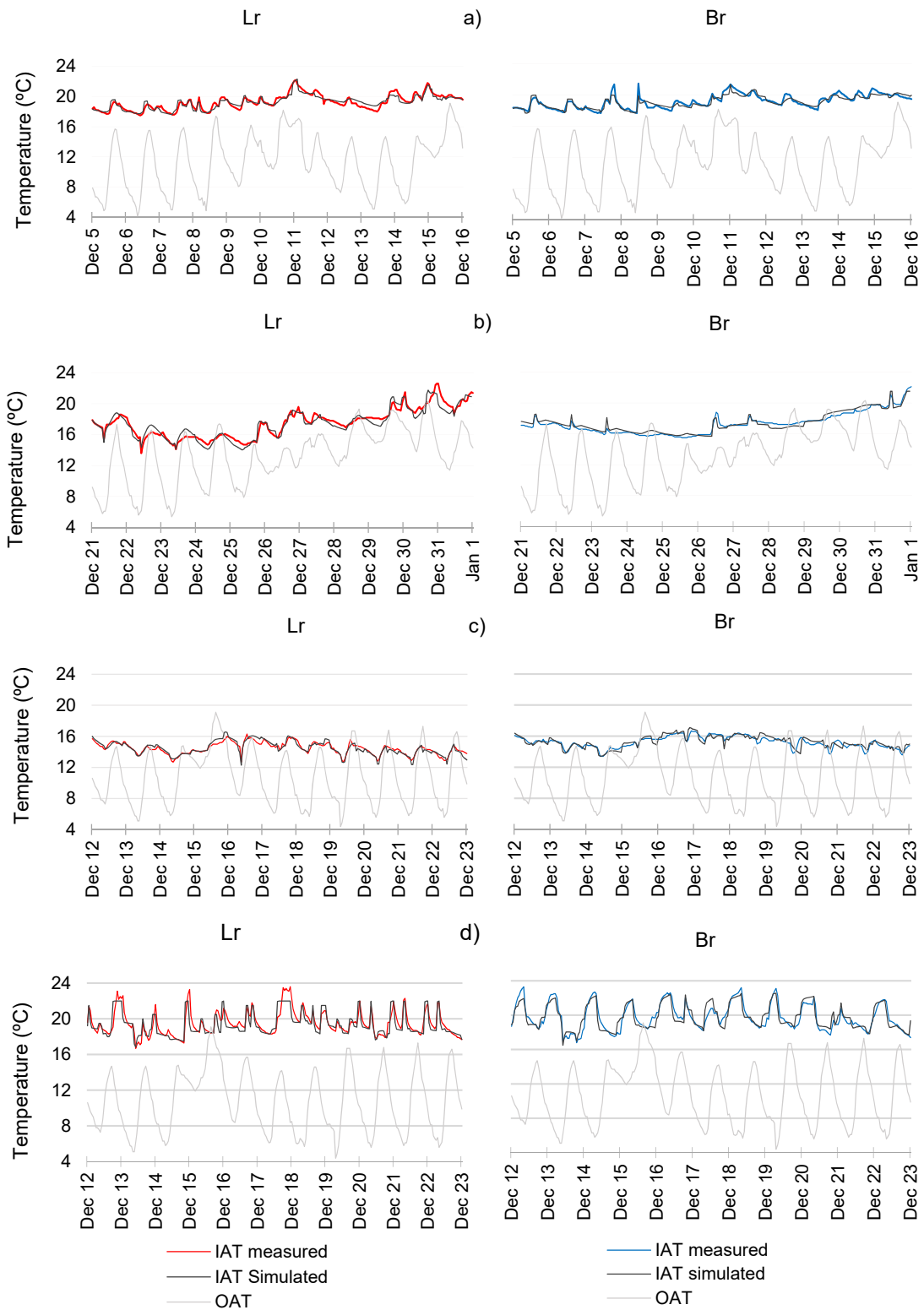


Fig. 26. Calibración gráfica de los modelos de simulación del Caso 1 (a), Caso 2 (b), Caso 3 (c) y Caso 4 (d) en condiciones de invierno.

Con el fin de establecer prioridades de intervención, los resultados sobre **cargas térmicas** para el periodo de 11 días, referentes al valor medio entre Lr y Br, se clasificaron en dos grupos. En el primero se incluyeron aquellas cargas relacionadas con el comportamiento humano y en el segundo, las relacionadas con las condiciones físicas de la envolvente de las viviendas. Las primeras dependen de los siguientes factores: presencia, uso de electrodomésticos y dispositivos, iluminación, calefacción, refrigeración, ventilación natural y sombreado de ventanas. Las segundas de las infiltraciones de aire y la transferencia de calor a través de muros, cubiertas, soleras, suelos y ventanas. Debido al hecho de que el grado de transformación de la envolvente de los edificios catalogados C y D es limitado (Tabla 1), el análisis de la contribución de cada elemento al balance total de pérdidas, en invierno, o de ganancias, en verano, debe hacerse con mayor precisión que en los edificios no catalogados, para determinar dónde deben concentrarse los esfuerzos de mejora. La realización de este análisis fue posible gracias a la capacidad de *Energy Plus*® para calcular el flujo de calor en los límites de las superficies y atribuir una carga térmica al espacio analizado derivada de cada elemento constructivo. Sus resultados se muestran en la Fig. 27 (condiciones de verano) y la Fig. 28 (condiciones de invierno).

Los resultados sobrecargas térmicas relacionadas con el **comportamiento humano** (a la izquierda en las Fig. 27 y 28) muestran que las cargas internas de ocupación son considerablemente más bajas en verano que en invierno, en conformidad con la información sobre hábitos de vida recabada en las encuestas. Además, a pesar de que ninguno de los casos de estudio se adapta al perfil de usuario en riesgo de pobreza energética, en uno de los cuatro casos (Caso 3) apenas se hace uso de los sistemas de climatización, ni en invierno ni en verano, aunque las condiciones exteriores e interiores registradas fueron severas.

En verano, la **ventilación natural nocturna** y el uso de la refrigeración son las dos estrategias que contrarrestan las ganancias internas, las solares y las producidas a través de la envolvente. Es importante señalar que en los casos en los que las ventanas de los salones y dormitorios abren hacia calles muy concurridas, con mucha frecuencia los residentes declaran renunciar a ventilar naturalmente en verano para evitar las molestias producidas por el ruido. En invierno la ventilación natural es muy infrecuente y de ciclos cortos, para evitar las pérdidas de calor, y el uso de los sistemas de calefacción es la única medida posible de contrarrestar las considerables pérdidas de calor producidas a través de la envolvente.

Las ganancias de calor por **radiación solar** a través de las ventanas son importantes tanto en verano (desfavorable) como en invierno (favorable). En verano, el uso apropiado de los mecanismos de sombreado por parte de los residentes debe incluirse entre las medidas prioritarias a incluir en las estrategias de rehabilitación. Para edificios de vivienda en la misma localización geográfica, León *et al.*[145] calcularon que la demanda anual global de climatización puede reducirse entre el 10 y el 27%, dependiendo de la orientación solar, cuando se optimizan estos mecanismos. En invierno, las viviendas más beneficiadas por la radiación solar en las ventanas son aquellas cuya fachada principal está orientada a sur (Casos 1 y 3). La optimización del patrón de uso de las persianas es una estrategia pasiva que podría reducir la carga de

calefacción también en invierno. Sin embargo, determinar este patrón es más difícil para las condiciones de invierno, cuando la variabilidad de horas de sol y nubosidad a lo largo del día es considerable, que para las de verano, cuando la variabilidad es menor. Por eso la eficacia de esta estrategia depende, en realidad, de mecanismos automatizados, que no son frecuentes en los edificios históricos y cuya implementación podría, en algunos casos, producir un conflicto con las normas de protección patrimonial de la fachada.

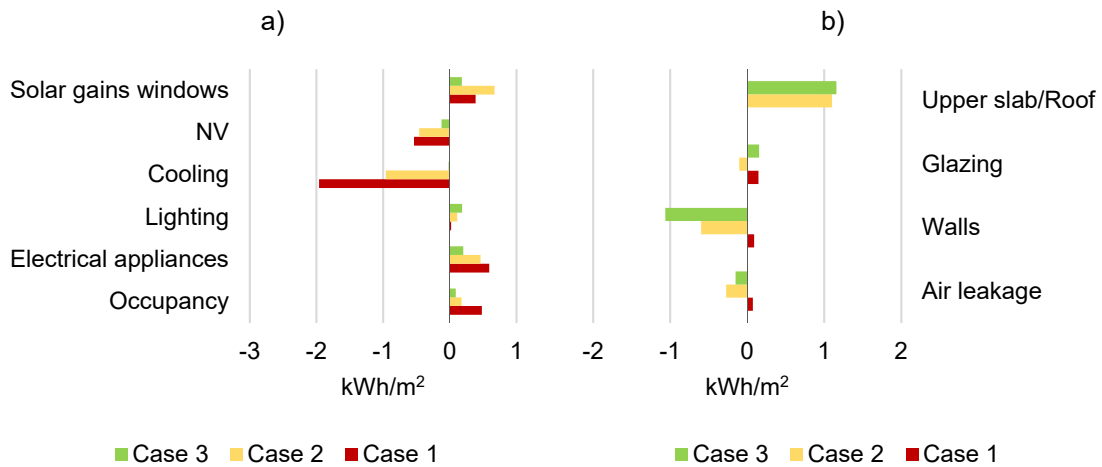


Fig. 27. Balance de cargas térmicas en condiciones de verano. A la izquierda (a) las cargas relacionadas con el comportamiento de los residentes y a la derecha (b) las relacionadas con el estado físico de la envolvente.

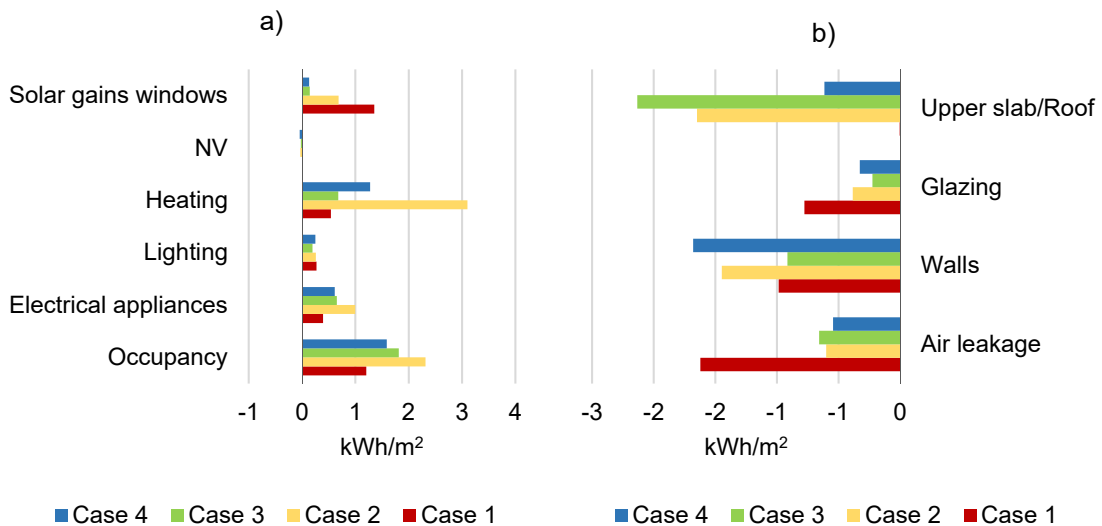


Fig. 28. Balance de cargas térmicas en condiciones de invierno. A la izquierda (a) las cargas relacionadas con el comportamiento de los residentes y a la derecha (b) las relacionadas con el estado físico de la envolvente.

En cuanto a los factores relativos a la **envolvente**, los resultados muestran que en verano las pobres cualidades térmicas de algunos elementos (acristalamiento, estanqueidad) pueden jugar un papel favorable en el balance de ganancias total, mientras que en invierno todos ellos resultan desfavorables porque ocasionan pérdidas de calor considerables. El porcentaje de contribución

de cada elemento de la envolvente al total de ganancias (verano) y pérdidas (invierno) se muestra en las Fig. 29 y 30

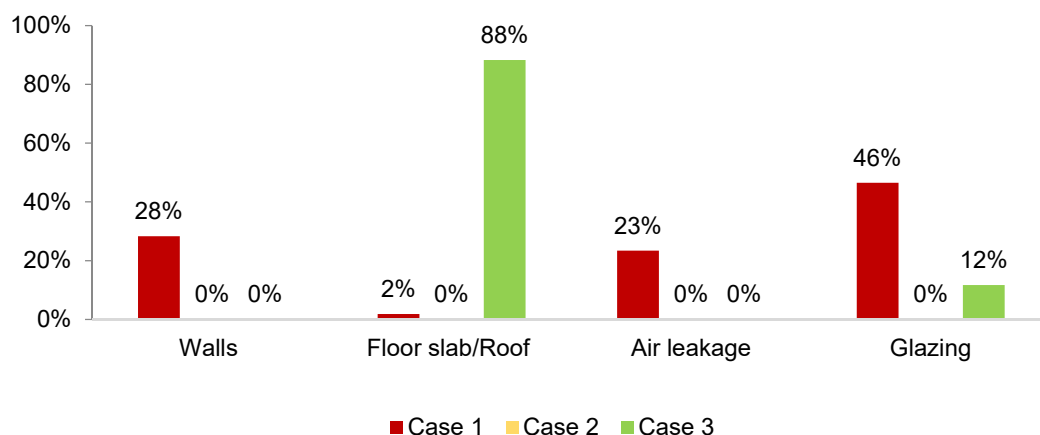


Fig. 29. Condiciones de verano. Porcentaje de ganancias térmicas producidas por cada elemento de la envolvente sobre el total para el periodo representativo analizado, considerando el valor medio de los espacios analizados (Lr y Br).

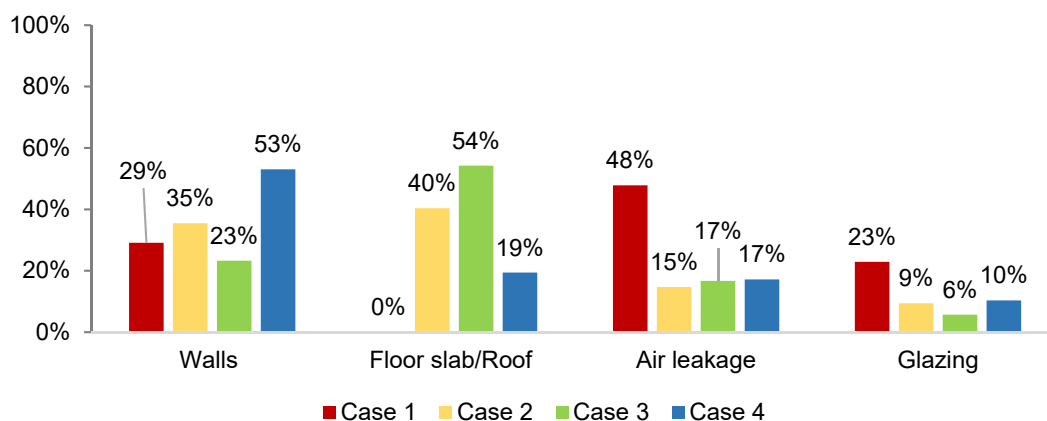


Fig. 30. Condiciones de invierno. Porcentaje de pérdidas térmicas producidas por cada elemento de la envolvente sobre el total para el periodo representativo analizado, considerando el valor medio de los espacios analizados (Lr y Br).

Los resultados de las Fig. 29 y 30 indican que la alta transmitancia térmica de la **cubierta** es desfavorable tanto en verano como en invierno. Esto es relevante para las viviendas localizadas en la última planta, como la del Caso 3, o para aquellas que cuenten con alguno de sus espacios bajo terraza, como en los Casos 2 y 4, rasgo muy frecuente de la tipología *Casas de Pisos* de Sevilla. La alta transmitancia térmica del **acristalamiento** juega generalmente un papel desfavorable en ambas estaciones, en diferente medida dependiendo de su superficie en relación al total de la envolvente y de la orientación solar. En invierno los **muros** producen entre el 20-50% de las pérdidas de calor totales a través de la envolvente. Las **infiltraciones de aire** son generalmente positivas en verano, contribuyendo al refrescamiento pasivo, y muy negativas en invierno, cuando producen entre el 15% y el 48% del total de pérdidas de calor, según el caso.

En vista de estos resultados, puede afirmarse que, de manera general, el impacto desfavorable ejercido por una envolvente de pobre calidad térmica sobre el balance de cargas es más acusado en invierno que en verano. Si consideramos el efecto conjunto de los muros, las cubiertas, el acristalamiento y las infiltraciones, resulta que la envolvente provoca, en el periodo analizado, muchas mayores pérdidas de calor en invierno que ganancias en verano en todos los casos, como se representa en la Fig. 31.

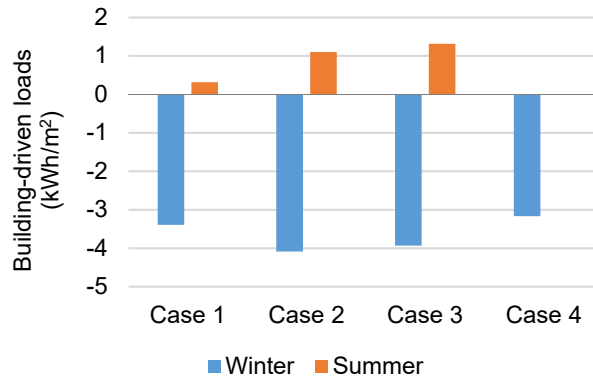


Fig. 31. Carga térmica conjunta en verano e invierno producida por los elementos de la envolvente (muros, cubiertas, infiltraciones y acristalamiento) en los casos de estudio. No se cuenta con datos de verano para el Caso 4.

Dos factores relativos a la envolvente merecen especial atención. El primero es la transmitancia térmica ( $U$ ) de los muros exteriores y el segundo las infiltraciones de aire ( $n_{50}$ ). Con respecto a  $U$ , es conveniente calcular la proporción de superficie total de muro exterior que está afectada por la protección patrimonial y cuya transmitancia térmica es difícil o imposible de mejorar. Si esta proporción es baja, y el muro de fachada tiene una orientación solar favorable en invierno, como puede ocurrir en algunas viviendas históricas con poca fachada y mucha profundidad, entonces puede resultar favorable en invierno la medida de aislar por el exterior los muros de los patios de manzana, como se simuló en los casos de estudio de la Sección 1 de esta tesis. Como medida general, no obstante, conviene valorar en detalle los posibles desequilibrios térmicos que pudieran ocasionarse por tener dentro de la misma vivienda unas zonas fuertemente aisladas y otras no. El aislamiento por la cara interior de los muros históricos es frecuentemente inviable por la reducción de superficie útil que provoca en viviendas de pequeño tamaño y también por el hecho de que las obras de rehabilitación energética se hacen frecuentemente con las viviendas ocupadas. Además, esta medida está relacionado con el aumento del riesgo de condensaciones [34], [35], [36], porque supone una resistencia al paso de vapor de agua, y produce sobrecalentamiento del aire interior en verano, al reducir drásticamente el efecto de la inercia térmica [38], [39], [40], [31]. Con respecto al segundo factor,  $n_{50}$ , éstas son responsables de pérdidas de calor considerables en invierno. Por tanto, un valor bajo de  $n_{50}$  es indispensable como medida de eficiencia energética. Sin embargo, como veremos en el siguiente apartado, en invierno, en ausencia de ventilación mecánica, su papel es decisivo para el mantenimiento de la calidad de aire interior.

### III. 2.2. Evaluación de las condiciones ambientales interiores.

La evaluación de las condiciones ambientales interiores de las viviendas se realizó de acuerdo a dos criterios: confort térmico y calidad de aire interior. Se basó en el análisis de los datos horarios registrados de temperatura de aire interior y exterior (IAT y OAT), humedad relativa interior y exterior (IRH y ORH) y concentración de CO<sub>2</sub> interior. Los datos fueron recabados en campañas de monitorización realizadas en verano y en invierno y sus resultados, procedimientos, equipamiento técnico, magnitudes medidas y su rango fueron descritos en el apartado anterior 2.1 (Tablas 3 y 4). La evaluación del bienestar térmico y la calidad del aire interior de las viviendas se refirió a los mismos dos periodos representativos de 11 días, uno de verano y otro de invierno, seleccionados para cada caso. Estos periodos incluían días laborables y fines de semana y un número total de horas de 264. Gracias al estudio detallado del perfil de uso de cada vivienda, realizado mediante el Método Mixto descrito anteriormente, se pudo calcular con bastante precisión el número real de horas de ocupación y de uso de los sistemas de climatización para cada caso (Tablas 7 y 8). De esta manera, el porcentaje de horas en las que los indicadores escogidos cumplían o quedaban fuera de los límites recomendados se ha podido referir a un número total de horas muy cercano al real, dotando a los resultados de mayor coherencia y solidez.

#### III.2.2.1. Evaluación de confort térmico.

Para la evaluación del confort térmico se aplicaron *modelos de confort térmico adaptativo*. Éstos se ajustan mejor que los basados en estados estacionarios [146] a los perfiles reales de uso de los sistemas de climatización identificadas en esta investigación, que, como se ha descrito en el apartado anterior 2.1, seguían un patrón intermitente común en la cultura del sur de Europa [147]. La teoría del confort adaptativo considera que, en edificios acondicionados de manera pasiva, cuando los ocupantes de un espacio interior en el que desarrollan actividades físicas sedentarias, tienen control sobre la apertura de ventanas y persianas y pueden adaptar libremente su vestimenta a las condiciones cambiantes interiores, la temperatura interior operativa óptima ( $T_{op}$ ) depende principalmente de las condiciones ambientales exteriores, variables en el tiempo, en una relación expresada por la siguiente ecuación lineal [148]:

$$T_{op} = a \cdot T_o + b$$

donde:

$T_{op}$  es la temperatura interior operativa óptima,

$T_o$  es la temperatura exterior media de funcionamiento ponderada exponencialmente,

$a$  y  $b$  son valores estadísticos relacionados con la adaptación a las condiciones climáticas regionales, determinados de manera empírica y diferentes en cada modelo.

A diferencia de los modelos estacionarios, donde existe una única  $T_{op}$  de verano y otra de invierno, aplicables a edificios climatizados mecánicamente de manera continua, en los modelos adaptativos  $T_{op}$  evoluciona a lo largo del tiempo, en función de las condiciones exteriores y el grado de adaptación y expectativas de cada región. Aunque los fundamentos teóricos de estos modelos son maduros, su aplicación presenta todavía algunas ambigüedades [148]. Diferentes modelos adaptativos producen resultados significativamente diferentes y la mayoría están diseñados para edificios en los que los sistemas de climatización no están en funcionamiento, dejando en un vacío metodológico a los edificios que funcionan en modo *híbrido*, como es el caso de las viviendas analizadas en esta tesis. En los edificios *híbridos* o de *modo mixto* (MM), se combinan técnicas de acondicionamiento térmico pasivo (basadas en el manejo libre de las ventanas, los sistemas de protección solar y la adaptación de la vestimenta) con el acondicionamiento activo, que funciona de manera intermitente, de manera que los ocupantes cambian de un modo a otro cuando lo consideran necesario.

En esta investigación se han aplicado tres diferentes modelos adaptativos con el objetivo de analizar las diferencias en los resultados: Standard 55, UNE-EN 15251 y modelo MM.

El primero, **Standard 55**, fue elaborado por la *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) [149]. En él se especifica que su modelo es aplicable a espacios donde se den las siguientes condiciones: (1) no existe sistema activo de refrigeración y la calefacción no está en funcionamiento, (2) los ocupantes realizan tareas sedentarias (1.0-1.3 met), pueden adaptar su ropa en un rango de 0.5 a 1.0 clo y tienen control sobre los mecanismos apertura y cierre de ventanas y persianas, (3)  $T_o$  está comprendida entre 10°C y 33.5°C. El segundo fue desarrollado por el Comité Europeo de Estandarización e incluido en la norma **UNE-EN 15251**<sup>3</sup> [138], para edificios o espacios en los que no se siguen estrictos protocolos de vestimenta, existen ventanas fácilmente operables a disposición de los ocupantes, cuya tasa metabólica oscila entre 1.0 y 1.3 met,  $T_o$  está comprendida entre los 10 °C y los 30 °C y los sistemas de climatización no están en funcionamiento. Ninguno de los modelos mencionados describe con exactitud el tipo de funcionamiento *híbrido* de las viviendas caso de estudio. Por ello, se ha aplicado también un tercer modelo alternativo (**modelo MM**), propuesto por Barbadilla-Martín *et al.* [150], para edificios con funcionamiento híbrido predominante en clima mediterráneo. En las gráficas de la Fig. 32 se representa la evolución diaria de los límites superiores e inferiores de  $T_{op}$  en los tres modelos descritos. Los valores han sido calculados para las temperaturas exteriores del mes de julio y de diciembre de 2017, registradas por AEMET para la ciudad de Sevilla.

---

<sup>3</sup> La norma UNE-EN 15251 fue publicada en 2007 y se mantuvo vigente hasta 2019, año en que fue sustituida por la UNE-EN 16798-1:2020. En ambas, la ecuación del modelo adaptativo y los límites admisibles para cada categoría de ambiente (I, II o III) son los mismos. En los artículos donde se difundieron los artículos que componen esta tesis se aplicó la UNE-EN 15251, vigente en el momento de realizar los trabajos. Sus resultados serían los mismos aplicando la nueva norma.



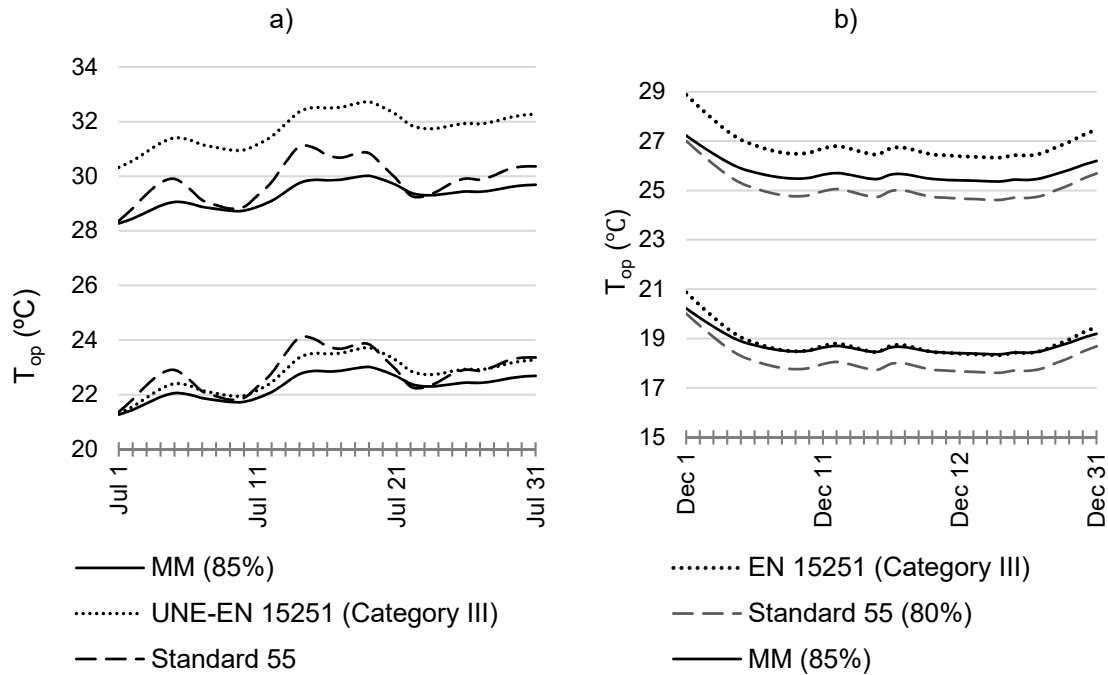


Fig. 32. Evolución de los límites admisibles superiores e inferiores de  $T_{op}$  en el mes de julio (a) y de diciembre (b) de 2017, de acuerdo a los tres modelos de confort adaptativo aplicados.

Como muestran las curvas de evolución de  $T_{op}$  de la Fig. 32, el modelo MM es el más restrictivo en condiciones de verano, mientras que en invierno plantea límites inferiores muy similares al de la UNE-EN 15251. Por ello, para el análisis del bienestar térmico en verano se aplicaron los tres modelos, mientras que para el de invierno se aplicaron únicamente el Standard 55 y la norma UNE-EN 15251. Para el mes de julio, las diferencias entre los límites superiores admisibles de los tres modelos son muy relevantes. La UNE-EN 15251 admite temperaturas interiores del aire en las viviendas de hasta 33 °C, el Standard 55 de 31°C y el modelo MM las limita a 30 °C. Para el mes de diciembre, las diferencias entre modelos no son tan acusadas. El Standard 55 admite una temperatura de aire mínima de 17.6 °C y la UNE-EN 15251 de 18.3 °C. En la aplicación de los tres modelos se consideraron niveles de prestación bajos: el Standard 55 para un porcentaje de satisfacción del 80%, el de la UNE-EN 15251 para edificios de Categoría III y el modelo MM para un porcentaje de satisfechos del 85%. Esta decisión se consideró justificada en virtud de las limitaciones a la transformación a las que deben someterse los edificios patrimoniales.

Los valores calculados de  $T_{op}$  y sus límites admisibles para los diferentes modelos, en grados Celsius (°C), fueron comparados con los datos registrados de IAT en el salón (Lr) y en el dormitorio (Br) de cada vivienda durante el periodo representativo de 11 días de verano y el de invierno. Para esta comparación se utilizaron dos índices: (1) desviación media de las IAT medidas en relación con  $T_{op}$  en grados Celsius (°C); y (2) porcentaje de horas ocupadas fuera de la banda de confort (%). En el cálculo de las horas fuera de confort se distinguió entre dos perfiles horarios: el primero de 24 horas y el segundo referido a las horas principales de uso de cada

habitación, durante el día para los salones (llamado *Day* en los gráficos) y durante la noche para los dormitorios (llamado *Night* en los gráficos).

Para las condiciones de verano, los resultados se representan gráficamente en las Figs. 33, 34 y 35; para las de invierno, en las Fig. 36, 37 y 38. En las Figs. 33 y 36 se representan las IAT registradas en forma de nube de puntos de IAT sobre bandas de confort. En las Figs. 34 y 37 se muestran en diagrama de barras el porcentaje de horas ocupadas fuera de confort. En las Figs. 35 y 38 se representan las desviaciones medias de  $IAT - T_{op}$ . En todos los casos se han distinguido los valores de los salones (Lr) y de los dormitorios (Br).

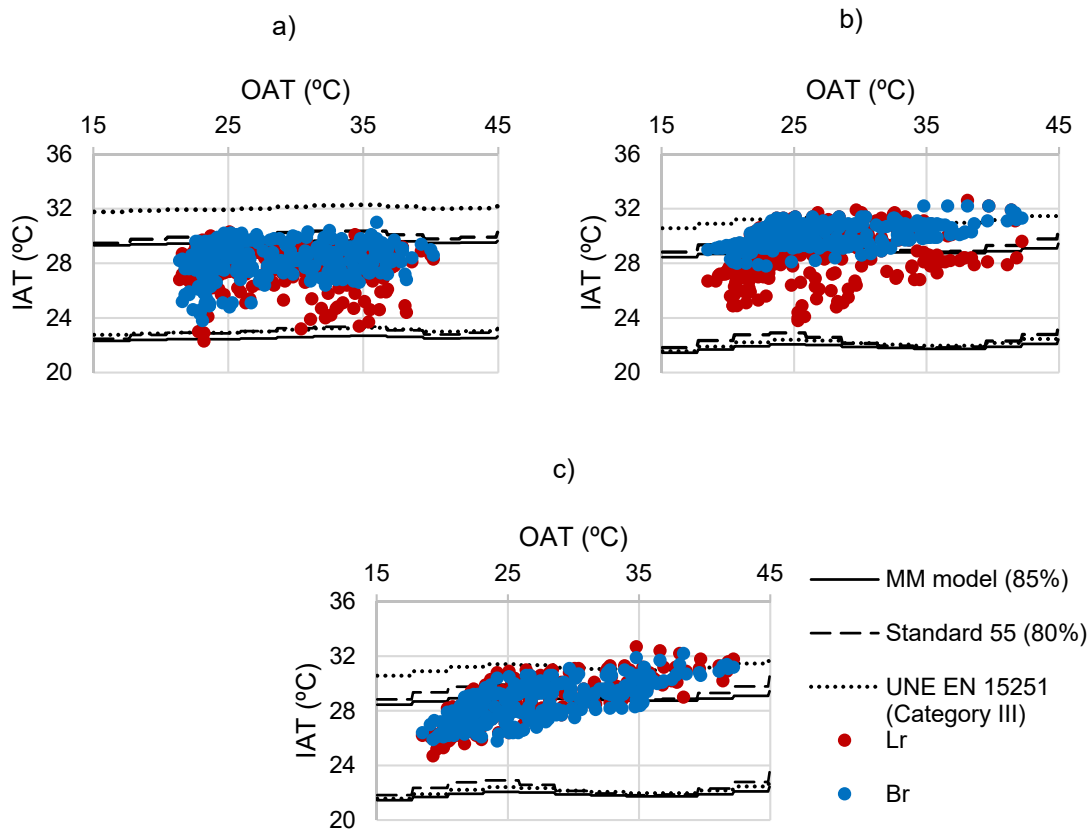


Fig. 33. Condiciones de verano. Evaluación de confort térmico en los salones (Lr) y dormitorios (Br) de las viviendas caso de estudio: Caso 1 (a), Caso 2 (b) y Caso 3 (c). Se presenta la comparación entre los tres modelos de confort adaptativo empleados en el análisis.

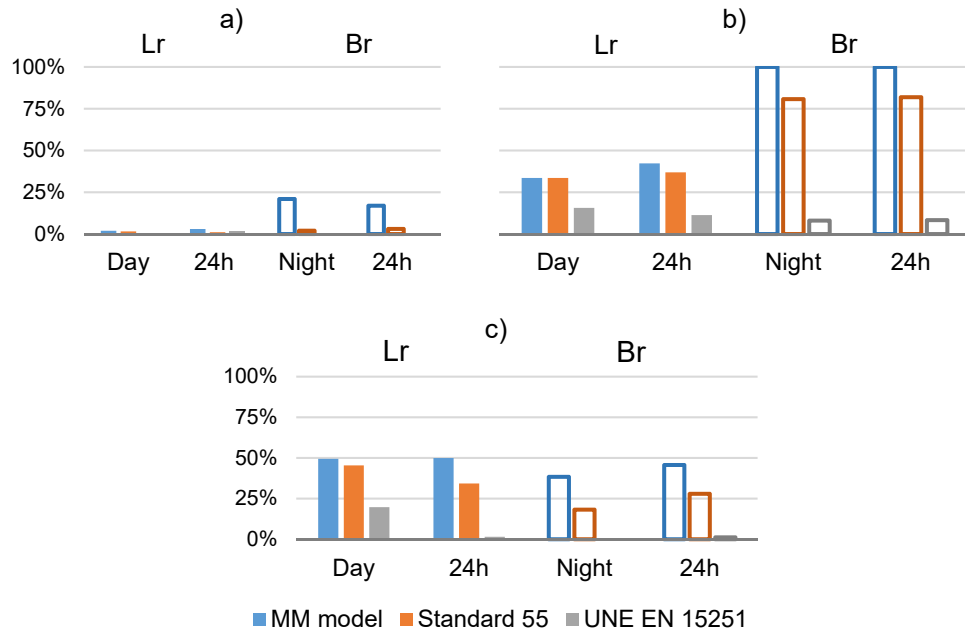


Fig. 34. Condiciones de verano. Porcentaje de horas fuera de la banda de confort en el salón (Lr) y dormitorio (Br) de los casos de estudio: Caso 1 (a), Caso 2 (b) y Caso 3 (c). Se presenta la comparación entre los tres modelos de confort y los dos perfiles de uso considerados durante el periodo representativo de 11 días.

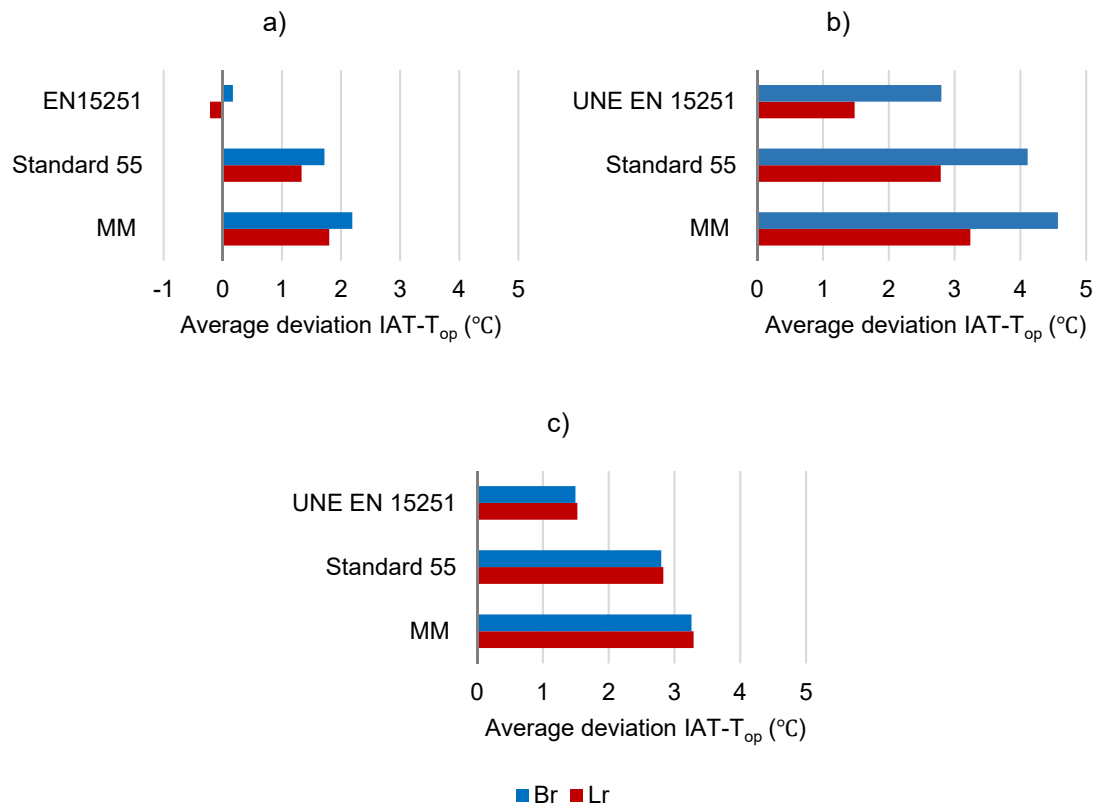


Fig. 35. Condiciones de verano. Desviación media de las IAT horarias en relación a los valores horarios de  $T_{op}$ , en salón (Lr) y dormitorio (Br) para el Caso 1 (a), el Caso 2 (b) y el Caso 3 (c), durante el periodo representativo de 11 días.

Según el modelo MM, el más restrictivo en condiciones de verano, el porcentaje de horas fuera de confort del Caso 1 no es significativo en Lr y no llega al 21% de las horas nocturnas en Br. Las diferencias con los otros dos modelos son relevantes. Según el Standard 55 y el de la UNE-EN 15251, tanto Lr como Br son casi siempre térmicamente confortables. Considerando los valores medios de Lr y Br, bajo el modelo MM, la desviación media de las IAT en relación con la  $T_{op}$  es de unos 2 °C. La vivienda del **Caso 1** muestra, bajo los tres modelos aplicados, los mejores resultados en verano, a pesar de que el valor medio de las IAT registradas, tanto en Lr como en Br, fue aproximadamente de 28 °C (Tabla 7), bastante superior a los 25 °C definidos en la normativa nacional como temperatura operativa en verano. Este sobrecalentamiento del aire interior del Caso 1 puede estar relacionado con la reducción del efecto de la inercia térmica, provocada por la colocación de aislamiento térmico por la cara interior del muro de fachada [151].

En la vivienda del **Caso 2** las diferencias entre las habitaciones son significativas. Dado que su dormitorio no cuenta con sistema de refrigeración, ni con la posibilidad de ventilación, las IAT están por encima de 31 °C durante el 44% de las horas totales. Bajo el modelo más restrictivo, modelo MM, este espacio está fuera de confort el 100% de las horas ocupadas. El salón muestra un mejor comportamiento, con un 34% de horas diurnas fuera de confort, de acuerdo al modelo MM, y una desviación típica de unos 3 °C. Aunque la refrigeración se ajustaba normalmente a una temperatura conservadora, su uso extendido (66% de las horas de ocupación) y su baja eficiencia (EER=2.30) pueden explicar el alto consumo eléctrico de esta vivienda, el mayor de los tres casos de estudio en verano. La costumbre de ventilar naturalmente el salón, declarada en las encuestas y reflejada en los datos de monitorización, no siempre pudo garantizar un confort térmico "natural" duradero ni el ahorro de energía y de emisiones de CO<sub>2</sub> resultante.

Bajo el modelo MM, el salón del **Caso 3** estuvo fuera del rango de confort térmico durante la mitad de las horas de ocupación diurna en verano. En el dormitorio resultaron fuera de confort el 38% de las horas nocturnas. Estos porcentajes son menores bajo el Standard 55 y mucho más bajos bajo el modelo UNE-EN 15251. El Caso 3 mostró un nivel de confort térmico razonablemente bueno en las severas condiciones exteriores del verano de 2017, a pesar de los altos valores de transmitancia térmica de la envolvente, la compacidad reducida (Tabla 6) y el uso limitado del sistema de refrigeración (4% de las horas de ocupación, Tabla 7). Aunque el consumo de electricidad en verano del Caso 3 fue un tercio del Caso 2, las horas fuera de confort en su salón fueron sólo un 16% superiores.

Los resultados muestran que sólo el Caso 1 fue térmicamente confortable en verano, con un 58% de horas ocupadas de funcionamiento de la refrigeración y un moderado consumo de electricidad. En las viviendas de los Casos 2 y 3 las condiciones de confort térmico no fueron aceptables. A excepción del Caso 3, donde salón y del dormitorio presentaron resultados de confort similares, los dormitorios fueron significativamente menos confortables que los salones durante el periodo analizado del verano de 2017. Esto se debió en parte a la ausencia de sistemas de refrigeración en estas habitaciones, lo que hizo depender el bienestar térmico exclusivamente de la ventilación natural nocturna.

En cuanto a las condiciones de invierno, las nubes de puntos de la Fig. 36 muestran que sólo las viviendas de los Casos 1 y 4 presentan condiciones de bienestar térmico bajo ambos modelos, que las IAT del Caso 2 tienen una considerable dispersión, quedando fuera del rango de confort con mucha frecuencia, y que la vivienda del Caso 3 está permanentemente fuera de confort.

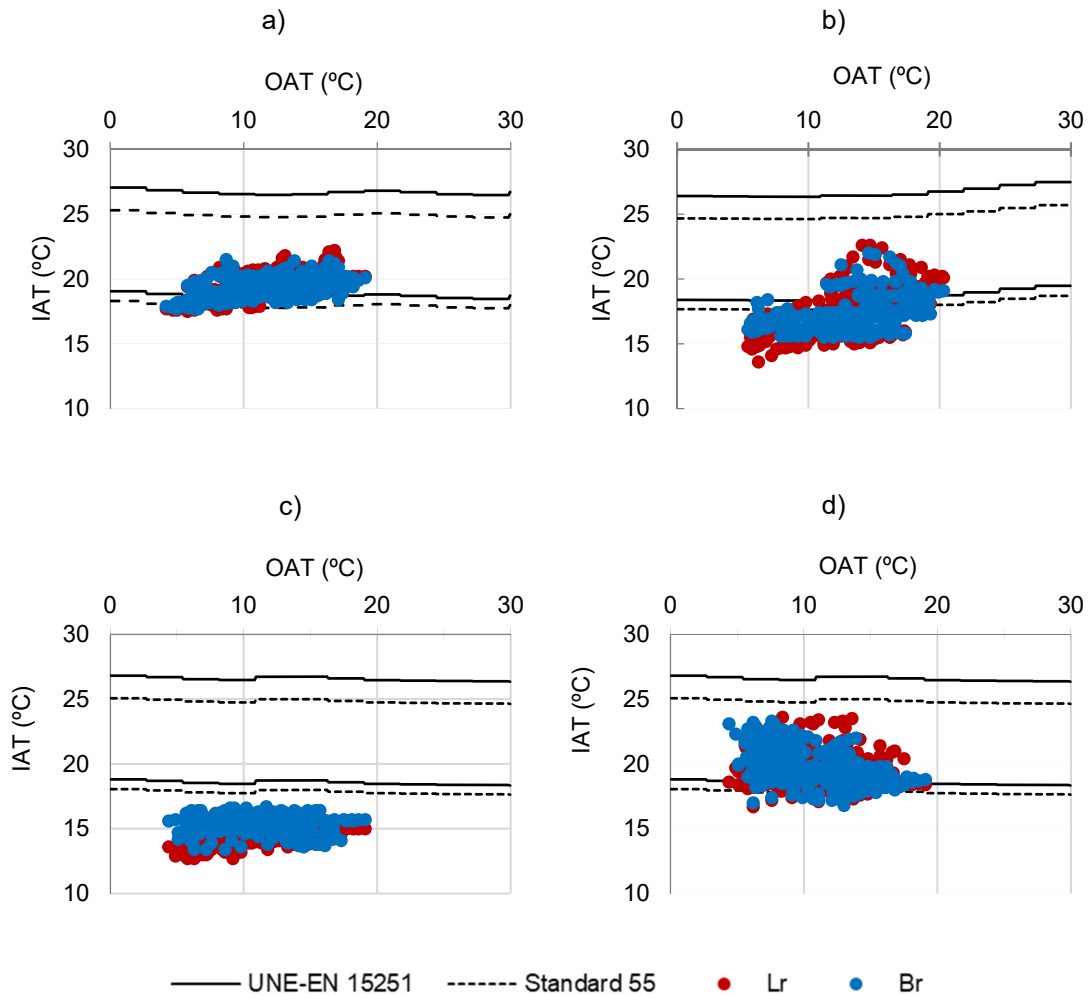


Fig. 36. Evaluación de confort térmico en el periodo de invierno en los salones (Lr) y dormitorios (Br) de las viviendas caso de estudio: Caso 1 (a), Caso 2 (b), Caso 3 (c) y Caso 4 (d). Se presenta la comparación entre los tres modelos de confort adaptativo empleados en el análisis.

El modelo de confort de la UNE-EN 15251 es más restrictivo que el Standard 55 para las condiciones de invierno, como se señaló anteriormente. Por ello, los resultados de los dos índices de confort son más desfavorables para el primero que para el segundo, como muestran los diagramas de barras de las Figs. 37 y 38. Con respecto al porcentaje de horas fuera de confort, la variación entre casos es significativa. La vivienda del Caso 3 está siempre fuera del confort, mientras que la vivienda del Caso 4 es casi siempre confortable. Es importante señalar también que, a pesar del uso regular de la calefacción, el dormitorio del Caso 1 presenta un 49% de horas nocturnas fuera de confort. En el del Caso 2 este porcentaje asciende al 75%.

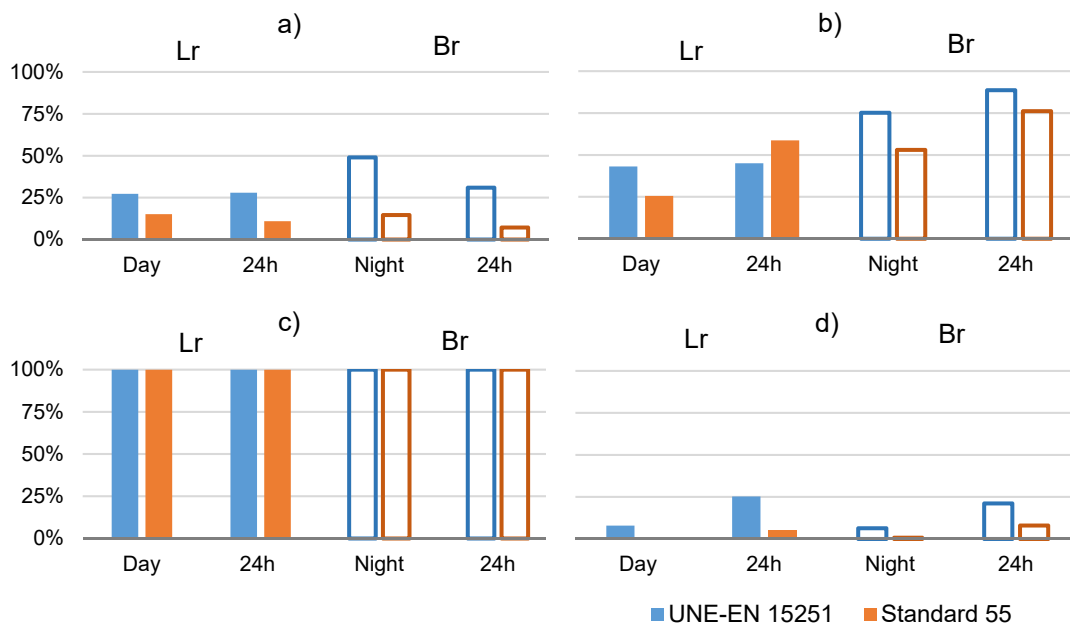


Fig. 37. Condiciones de invierno. Porcentaje de horas fuera de la banda de confort en el salón (Lr) y dormitorio (Br) de los casos de estudio: Caso 1 (a), Caso 2 (b), Caso 3 (c) y Caso 4 (d). Se presenta la comparación entre los dos modelos de confort y los dos perfiles de uso considerados.

En cuanto a la desviación media  $IAT-T_{op}$ , en invierno, el caso con peores resultados, según el modelo de la UNE-EN 15251, es la vivienda del Caso 3, donde la desviación alcanza los 8 °C en el salón. La falta de confort del salón del Caso 2 es llamativa también, con 5 °C de desviación media. En los salones de los Casos 1 y 4 la desviación se reduce a unos 3 °C.

Estos resultados muestran que solo las viviendas de los Casos 1 y 4, que hacen un uso intenso del sistema de calefacción (57% y 83% de las horas ocupadas, respectivamente) presentan condiciones aceptables de bienestar térmico en invierno. Ambas viviendas cuentan además con sistemas eficientes de bomba de calor con distribución por conductos, con COP = 2.70 (Caso 1) y COP = 4.00 (Caso 4). Pero incluso en ellas, las temperaturas interiores se desvían, de media, al alrededor de 3 °C de las temperaturas operativas de confort en las dos habitaciones analizadas. La inadecuación de los sistemas de calefacción utilizados en el Caso 2 (Tabla 5) conducen a una situación continua de malestar térmico y a un excesivo consumo de electricidad, el mayor de los cuatro casos analizados (Tabla 2). Esto la convierte además en la vivienda más contaminante. El Caso 2 es un ejemplo de climatización inadecuada en una vivienda reformada bajo estándares de baja calidad. El Caso 3, en régimen de libre evolución a pesar de no tratarse de un caso de pobreza energética, en invierno está siempre por debajo de los niveles de confort, con temperaturas inferiores a 8 °C, de media, con respecto a la temperatura de confort de referencia.

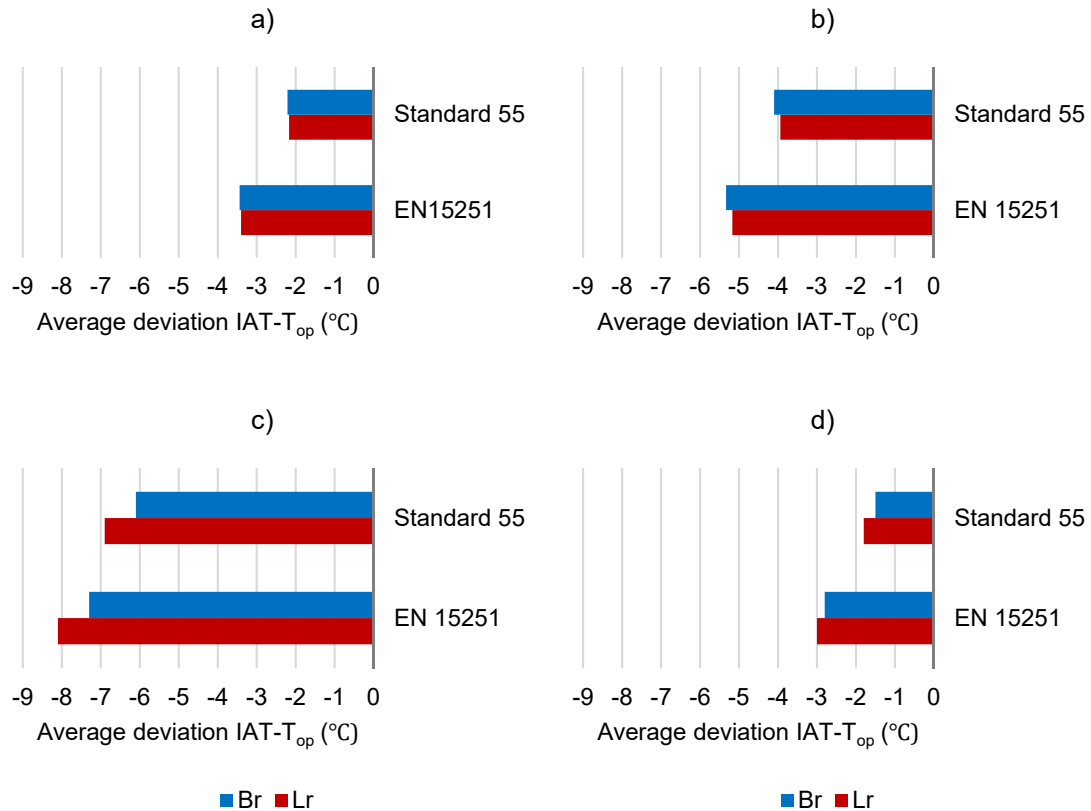


Fig. 38. Condiciones de invierno. Desviación media de las IAT horarias en relación a los valores horarios de  $T_{op}$ , en salón (Lr) y dormitorio (Br) para el Caso 1 (a), el Caso 2 (b), el Caso 3 (c) y el Caso 4 (d), durante el periodo representativo de 11 días.

### III.2.2.2. Evaluación de la calidad de aire interior.

Para la evaluación de la calidad de aire interior se emplearon dos indicadores: la concentración interior de  $CO_2$  en partículas por millón (ppm) y la tasa de humedad relativa interior (IRH) en porcentaje (%). La evolución horaria de ambos parámetros en salón y dormitorio de cada vivienda fue analizada durante los periodos representativos de 11 días de invierno y de verano.

Para el primero se adoptaron los límites contemplados por la *Finnish Society for Indoor Air Quality & Climate* [152], que considera tres categorías ambientales interiores: S1 (Muy buena), S2 (Buena) y S3 (Aceptable). Para el segundo se adoptaron los límites contemplados en el Código Técnico de la Edificación vigente en España [142] y en la norma europea UNE-EN15251: 2008 [153] (actualmente sustituida por la UNE-EN 16798-1:2020 [138]). Los valores límite de ambos indicadores en los estándares considerados se resumen en la Tabla 9.

**Tabla 9**

Condiciones admisibles de calidad de aire interior

Concentración de CO <sub>2</sub>		IRH	
Categorías [152]		Categorías [153]	
S1	<750 ppm	I	50-30%
S2	<900 ppm	II	60-25%
S3	<1200 ppm	III	70-20%
		IV	>70%, <20%
		CTE DB HE2 (invierno)	40-50%

Según se deduce de los datos de monitorización presentados anteriormente (Tablas 7 y 8), durante el periodo de verano, los valores de concentración de CO<sub>2</sub> en el interior de las viviendas nunca superaron el límite superior de 1200 ppm y los valores medios nunca alcanzaron los 500 ppm (Fig. 21). Estas buenas condiciones son debidas a la baja ocupación en relación con el volumen de la vivienda, la práctica habitual de ventilar naturalmente y la costumbre de mantener las puertas interiores abiertas. Los resultados no son tan favorables para las condiciones de invierno, especialmente en los dormitorios, como muestra la Fig. 39. Por ello, su evaluación requirió un estudio más detallado, cuyos resultados se resumen gráficamente en la Fig. 40.

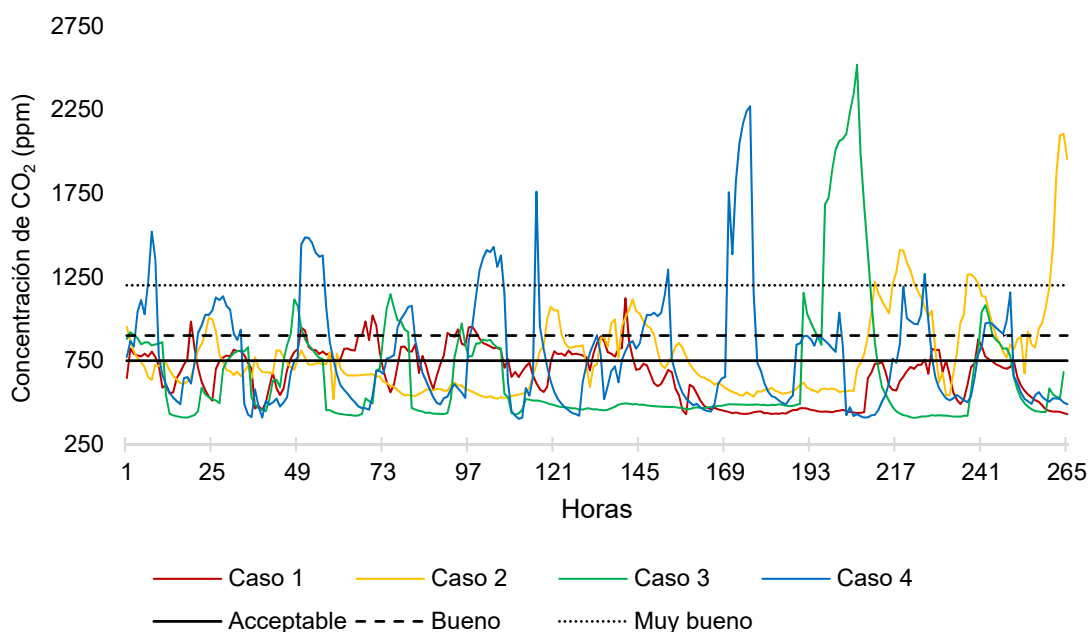


Fig. 39. Evolución horaria de la tasa de concentración de CO<sub>2</sub> en los dormitorios de las cuatro viviendas durante el periodo representativo. Se indican, en líneas negras, los niveles considerados aceptables, buenos y muy buenos en [152].



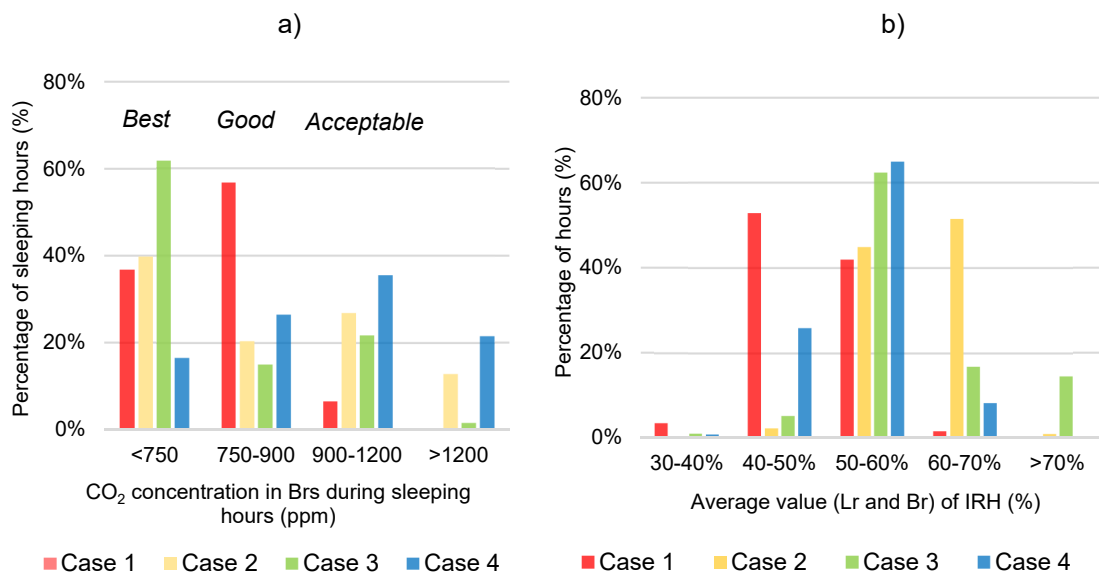


Fig. 40. Histogramas sobre la concentración de CO<sub>2</sub> y los niveles de IRH en los cuatro casos de estudio durante el periodo representativo de 11 días de invierno. A la izquierda (a) se muestra la distribución de horas nocturnas de acuerdo con el nivel registrado de CO<sub>2</sub>. A la derecha (b), la distribución de horas ocupadas totales de acuerdo con su nivel de IRH, considerando los valores medios entre dormitorio (Br) y salón (Lr) de cada vivienda.

En la Fig. 40a se muestra, para los dormitorios de las cuatro viviendas, la clasificación de las horas nocturnas en cuatro grupos, correspondientes a los márgenes de calidad de concentración de CO<sub>2</sub> adoptados. En la Fig. 40b las horas totales de ocupación se distribuyen en cinco grupos en función de las tasas de IRH registradas. En este caso, se dan los valores medios de salones (Lr) y dormitorios (Br). Estos resultados indican que, en invierno, la concentración de CO<sub>2</sub> en los dormitorios, ocupados de manera continua y con las ventanas y puertas cerradas para evitar las pérdidas de calor, está por encima del límite considerado "bueno" durante una parte considerable de las noches, especialmente en las viviendas con mayor estanqueidad al aire, como el Caso 4. En esta vivienda las carpinterías de la fachada principal, a la que da el dormitorio monitorizado, fueron sustituidas en 2010 por otras nuevas con gran estanqueidad al paso del aire (Tabla 6).

En cuanto a la evolución de las tasas de IRH, en verano éstas permanecieron dentro del rango del 20-70% contemplado por la UNE-EN 15251 para edificios Categoría III, y sólo fueron excedidas puntualmente en los Casos 1 y 2. Sin embargo, en invierno, los niveles de IRH son con regularidad moderadamente altos para los cuatro casos de estudio y en ninguno de ellos se cumpliría la normativa nacional [142], que establece un rango admisible de 40-50% (Tabla 9) para las viviendas durante la estación de invierno. Esto ocurre incluso en viviendas que hacen un uso intenso de la calefacción, como los casos 1, 2 y 4, con porcentaje de horas de uso de la calefacción sobre las horas de ocupación del 57%, 40% y 83%, respectivamente (Tabla 8). Aunque los niveles más favorables de IRH se midieron en la vivienda del Caso 1, incluso allí, durante el 42% de las horas ocupadas éstos superaron el 50%. El caso más desfavorable es el de la vivienda del Caso 2, donde en la mitad de las horas de ocupación los niveles de IRH superaron el 60%. El Caso 3, de manera continua en libre evolución por el casi inexistente uso

de la calefacción, presentó un 32% de horas ocupadas con índices de IRH superiores al 60% y un 15% por encima del 70%. La baja calidad higrotérmica de sus envolventes, unida al hecho de que tanto en Caso 2 como 3 sean viviendas de última planta, podría explicar este mal comportamiento.

### III.3. Sección 3. Introducción de energía renovable en los edificios patrimoniales de vivienda en clima mediterráneo (artículo 4).

En la tercera sección de esta tesis doctoral se abordó un análisis encaminado a averiguar hasta qué nivel es posible reducir el consumo de energía fósil de las viviendas patrimoniales de la región mediterránea (es decir, descarbonizarlas), cumpliendo con la normativa de protección de patrimonio y mejorando al mismo tiempo sus condiciones ambientales interiores. Para ello, se seleccionó uno de los cuatro edificios analizados en la Sección 2 anterior, se evaluó su comportamiento energético y el bienestar térmico en el interior de sus viviendas y, en función del diagnóstico alcanzado, se diseñó una propuesta de rehabilitación energética integral compatible con la normativa de protección patrimonial que afecta al edificio, al paisaje urbano circundante y a los restos arqueológicos que pudieran encontrarse en su subsuelo. Incluyó un conjunto de medidas pasivas y activas; entre las últimas se incluyó la instalación de un sistema de ventilación mecánica y de un sistema híbrido que, integrando energía renovable con electricidad de la red, cubría la totalidad de la demanda térmica del edificio (agua caliente sanitaria, calefacción y refrigeración). El método de análisis consistió en comparar los resultados de simulación energética dinámica del edificio en su estado actual y en el estado rehabilitado. La comparación se centró en los resultados de consumo de energía final (FE) y primaria (PE) durante un año completo, cuantificándose su porcentaje de desviación con respecto al límite impuesto por el actual CTE DB HE0 [154] en la rehabilitación de edificios no catalogados situados en la misma zona climática.

El edificio seleccionado fue el denominado en esta tesis Caso 3, un *Corral de Vecinos* construido en el siglo XVIII y reformado parcialmente en 1992, un claro ejemplo del tipo de afección patrimonial múltiple que afecta a una gran cantidad de edificios de viviendas localizados en ciudades históricas mediterráneas. Sus valores arquitectónicos están protegidos por el planeamiento urbanístico, que lo catalogó por su interés tipológico en el nivel C, de acuerdo con la clasificación en cuatro niveles descrita en la Sección 2 anterior. Debido a ello, las intervenciones sobre él deben regirse por normas específicas de protección que limitan, entre otros aspectos, la modificación de su fachada (ver Tabla 1 en la Sección 2).

El edificio es también un ejemplo muy bien conservado de su tipología (Fig. 41). A diferencia de otros *corrales de vecinos* que han sido objeto de intervenciones invasivas que han provocado la pérdida de gran parte de su carácter, ofrece una buena oportunidad para investigar el verdadero potencial de una ambiciosa rehabilitación energética que atienda a la preservación de sus valores patrimoniales. Sus 510 m<sup>2</sup> de superficie útil se dividen en tres plantas, con un volumen neto de 1,907 m<sup>3</sup>. Tiene 13 viviendas, siendo 39 m<sup>2</sup> la superficie media útil por vivienda (Fig. 42).



Fig. 41. Tres vistas del edificio caso de estudio. A la izquierda, la fachada con la entrada a la Iglesia de San Gil, al final de la Calle Sagunto. A la derecha, dos imágenes del patio comunitario interior a través del cual se accede a las viviendas.



Fig. 42. Plantas del edificio caso de estudio en la calle Sagunto, 3 de Sevilla, donde las viviendas aparecen numeradas. En color ocre se han sombreado las superficies de uso comunitario: P: patio, T: terraza, FT: terraza sobre cubierta plana.

El edificio analizado se localiza en el número 3 de la Calle Sagunto de Sevilla, muy cerca de la Muralla Histórica y a unos 40 metros de distancia de la Iglesia de San Gil (Fig. 43). Esta iglesia fue edificada sobre una antigua mezquita en la segunda mitad del siglo XIII y es un ejemplo temprano de la arquitectura religiosa gótico-mudéjar en Andalucía. Fue declarada Bien de Interés Cultural en 1931 y, de acuerdo con la Ley 14/2007 de Patrimonio Histórico de Andalucía [25], goza de un *entorno de protección* constituido por aquellas parcelas y espacios que los circunden hasta la distancia de 50 metros<sup>4</sup> (Fig. 44). Además, por tratarse de un bien inscrito en el Catálogo General de Patrimonio Histórico de Andalucía [155], en virtud del artículo 19 de la citada ley, las ordenanzas municipales están obligadas a controlar las intervenciones sobre los edificios incluidos en su *entorno de protección* para evitar la contaminación visual o perceptiva sobre la iglesia. Los elementos que requieren de este tipo de control son, entre otros, “las construcciones o instalaciones de carácter permanente o temporal que por su altura, volumetría o distancia puedan perturbar su percepción”, así como “las instalaciones necesarias para los suministros, generación y consumo energéticos”.

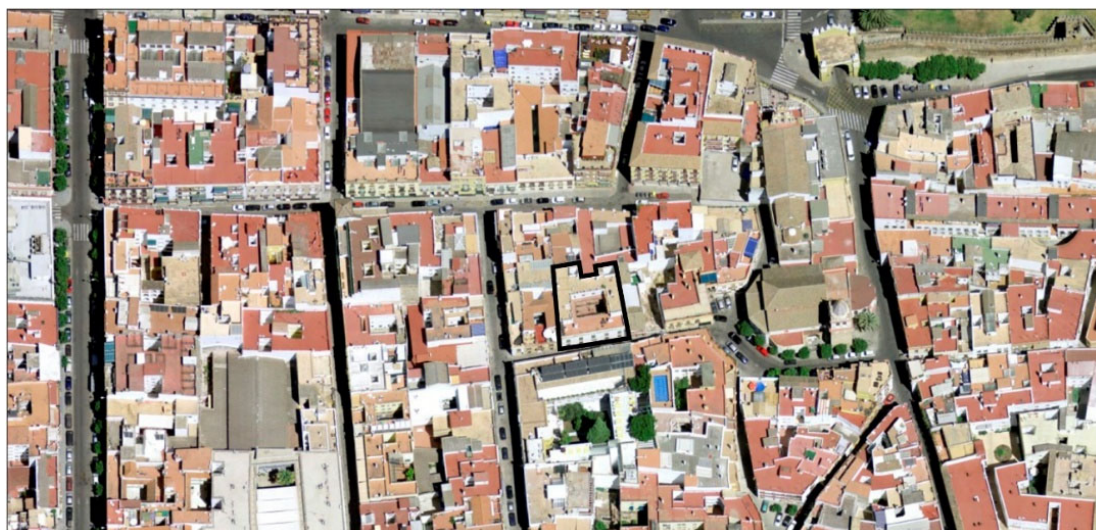


Fig. 43. Entorno urbano del edificio caso de estudio en la calle Sagunto, 3 de Sevilla. El perímetro del edificio aparece marcado en línea negra gruesa. A la derecha se ve la Iglesia de San Gil y más arriba el Arco de la Macarena de la Muralla Histórica, ambos monumentos declarados BIC.

El Plan Especial de Protección del Sector San Gil-Alameda determina, en el artículo 32 de sus Ordenanzas, que: “Cualquier proyecto de sustitución, construcción de nueva planta o ampliación del inmueble incluido en el entorno del Bien catalogado deberá de aportar la documentación fotográfica, planimétrica, así como la documentación necesaria para el estudio que permita aportar aspectos visuales de interés dentro de la trama propia de la zona y su incidencia sobre el bien correspondiente”. Esto significa que el proyecto de rehabilitación del edificio caso de estudio, por estar localizado dentro del entorno de protección de la Iglesia de San Gil, tendría que someterse a una evaluación municipal adicional para determinar el posible impacto visual

---

<sup>4</sup> El anteproyecto de Ley por el que se modifica la Ley 14/2007, de 26 de noviembre, del Patrimonio Histórico de Andalucía, actualmente en elaboración, recoge la misma disposición en su apartado veintinueve [26].

sobre ésta y, en su caso, el promotor podría estar obligado a eliminar o mitigar la contaminación visual o perceptiva ocasionada.

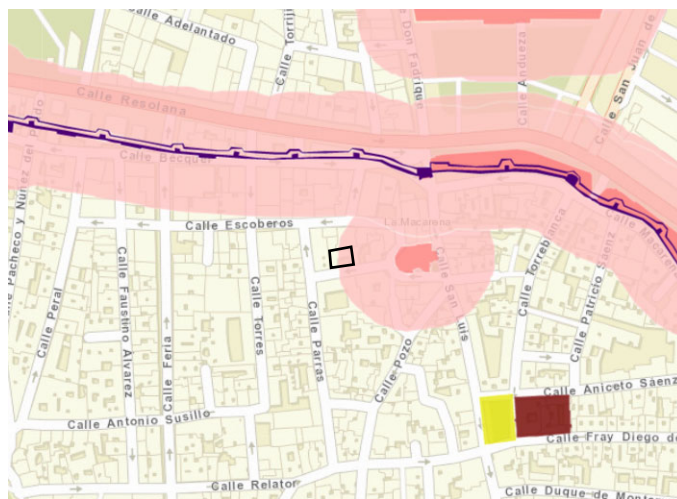


Fig. 44. Detalle del mapa de los monumentos con inscripción genérica o con declaración BIC en el Catálogo General del Patrimonio Histórico Andaluz de Sevilla, disponible en ide.SEVILLA [123]. En trama de color rosado claro se marcan sus entornos de protección. El perímetro del edificio caso de estudio aparece señalado en línea negra gruesa.

Las Ordenanzas Municipales sobre protección del patrimonio arqueológico que rigen sobre todo el Conjunto Histórico de Sevilla afectan también a la parcela sobre la que se sitúa el edificio caso de estudio. Tales ordenanzas tienen por finalidad garantizar la documentación y tutela de los bienes arqueológicos subyacentes (bajo la cota de superficie) y emergentes (sobre la cota de superficie). En función de su mayor o menor presunta riqueza arqueológica, cada parcela del Conjunto Histórico está clasificada en tres grados (I, II y III), de mayor a menor nivel de protección. La parcela sobre la que se levanta el edificio caso de estudio está sobre un suelo objeto de cautela arqueológica en Grado II. Para todos los grados, la concesión de licencia de obras está supeditada a la realización de un estudio arqueológico previo. Este estudio deberá determinar la importancia de lo encontrado y puede derivar en medidas concretas de conservación, en una ampliación de la superficie afectada o en el aumento del grado de protección. La medida prescrita más habitualmente es la *conservación bajo cubrimiento no visible*, por la que los restos se consolidan, se protegen y se les proporciona un adecuado cubrimiento, pudiéndose extraer alguno de ellos si se estima necesario. Esto significa que, en caso de encontrarse restos arqueológicos de interés en la parcela del edificio, una capa de suelo bajo rasante, hasta aproximadamente 1 metro de profundidad en toda su extensión, quedaría legalmente protegida y debería conservarse.

En resumen, el edificio objeto de estudio está sometido a una triple protección patrimonial. La primera deriva de sus valores arquitectónicos propios (catalogación C), la segunda de su localización en el entorno de protección de un monumento catalogado Bien de Interés Cultural y la tercera de su localización en un área de cautela arqueológica. Esta protección triple tiene un impacto significativo sobre las posibilidades de mejora de su comportamiento energético y

ambiental. La protección de la fachada impide la colocación de aislamiento térmico por su cara exterior para reducir su transmitancia, a pesar de que, como muestran los resultados de la Sección 2, es responsable de una gran parte de las pérdidas de calor en invierno. La colocación por el interior, además de resultar poco viable por el pequeño tamaño de las viviendas y por el hecho de estar ocupadas, puede causar efectos adversos [31], [32], como la aparición de humedades de condensación [34], [35], [36] y, en un clima tan caluroso como el de Sevilla, el sobrecalentamiento del aire interior [37], [38], [39], [40]. La prevención de contaminación visual podría impedir o dificultar mucho la integración de sistemas de energía renovable basados en colectores solares (fotovoltaica o solar térmica), así como de otros sistemas térmicos de alta eficiencia y que suelen ocupar grandes volúmenes. La normativa sobre cautela arqueológica podría imposibilitar la instalación de sistemas renovables de apoyo basados en geotermia, a pesar de ser excelentes soluciones cuando se combinan con sistemas híbridos en climas cálidos [156], [157].

Otros aspectos de naturaleza morfológica y de uso, no directamente relacionadas con las políticas de protección patrimonial, también dificultan la instalación de sistemas renovables basados en colectores solares que necesitan grandes superficies. En las zonas urbanas densas de las ciudades mediterráneas, el efecto urbano del sombreado entre edificios, de muy diversos tamaños y formas y muy próximos entre ellos, y el uso intensivo de las terrazas, que comparten espacio con múltiples instalaciones como escaleras y huecos de ascensor, zonas de seguridad perimetrales, almacenes, antenas y aparatos de aire acondicionado, provocan que la superficie aprovechable de cubierta para usos solares rara vez supere el 40% [158]. El edificio escogido como caso de estudio es un buen ejemplo de esta última circunstancia: el uso intenso y continuado de su terraza por parte de los vecinos para fines recreativos y también prácticos deberá coexistir con las nuevas instalaciones. La generosa superficie de terraza en relación con el número de viviendas es un factor favorable (Fig. 45), pero el plan de rehabilitación deberá evitar el diseño de medidas que no produzcan conflicto con los usos existentes.

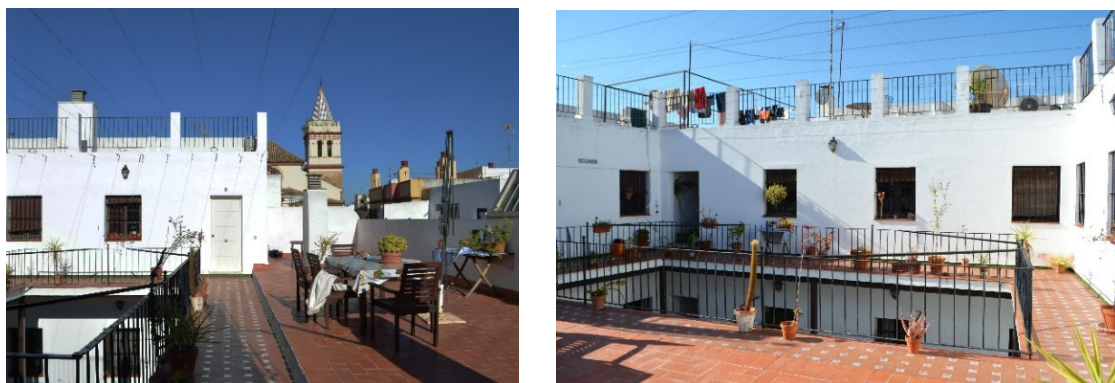


Fig. 45. Vistas de las terrazas de uso comunitario sobre las cubiertas del edificio caso de estudio. En la imagen de la izquierda es visible la torre de la iglesia de San Gil en el plano de fondo.

El edificio fue objeto de reforma en 1992, como se mencionó en la Sección 2. Ésta incluyó mejoras en la impermeabilización de la cubierta, la fontanería, las redes de agua y electricidad y en los acabados de las fachadas y las carpinterías, pero no se contemplaron medidas específicas sobre eficiencia energética. Actualmente, en las viviendas, la calefacción y la refrigeración se suministran habitación por habitación con radiadores eléctricos portátiles de aceite y/o bombas de calor aire-aire, de diferente antigüedad y estado de mantenimiento. El agua caliente sanitaria (DHW, por la abreviación en inglés de *Domestic Hot Water*) se produce con calentadores de agua eléctricos (EWH, por la abreviación en inglés de *Electric Water Heater*). La única forma de ventilación es natural, a través de las ventanas. En varios casos existen conductos de extracción de aire en los techos de baños y cocinas, pero generalmente están cegados o mal mantenidos y no funcionan correctamente. La única fuente de suministro de energía es la electricidad de la red pública (PEG, por la abreviación en inglés de *Public Electricity Grid*).

El diseño y la evaluación del plan integral de rehabilitación energética del edificio llevado a cabo en esta sección se realizó en tres fases. La primera consistió en la construcción, simulación y validación de un modelo energético denominado BC por su abreviación en inglés de *Base Case*, que representa el estado actual del edificio. Los datos de entrada necesarios para su construcción, simulación y validación se obtuvieron de la auditoría energética realizada en una de sus viviendas en 2017, cuyos resultados se presentan en la Sección 2 de esta tesis. La segunda fase consistió en la evaluación y diagnóstico del comportamiento energético de BC. En la tercera, a partir del diagnóstico de BC, se construyó, simuló y evaluó un segundo modelo llamado OC, por la abreviación en inglés de *Optimal Case*. El modelo OC representa un escenario optimizado en el que el edificio es objeto de una rehabilitación energética integral, abordando las deficiencias energéticas y ambientales identificadas y teniendo en cuenta las limitaciones derivadas de las normas de protección patrimonial. Los modelos fueron construidos con la herramienta *Design Builder®* de *Energy Plus®* [127]. Se analizaron los resultados horarios de simulación correspondientes a un año completo. El diagrama de la Fig. 46 resume el proceso descrito.

El modelo BC se construyó, en primer lugar, escalando desde el nivel de la habitación (BCr) al nivel de la vivienda (BCd) y, en segundo lugar, al nivel del edificio (Fig. 46). Los modelos a nivel de habitación (BCr), uno del salón (Lr) y otro del dormitorio (Br), fueron construidos para una vivienda concreta del edificio, situada en la planta segunda (número 12 en la Fig. 42). Esta vivienda fue objeto de una auditoría energética en el año 2017, en la que se realizó una campaña de monitorización de las principales variables ambientales, se caracterizó su envolvente y se definieron los perfiles de uso. Las conclusiones sobre su balance energético, confort térmico y calidad de aire interior, en verano y en invierno, fueron incluidos en los artículos 2 y 3 que componen esta tesis y se han resumido en su Sección 2 (Caso 3). Utilizando los dos modelos de salón y dormitorio (BCr) como punto de partida, se generó un nuevo modelo de la vivienda completa correspondiente (BCd), eliminando los tabiques interiores y añadiendo la masa térmica equivalente. Los perfiles de uso modelados en BCd fueron los deducidos en la auditoría.



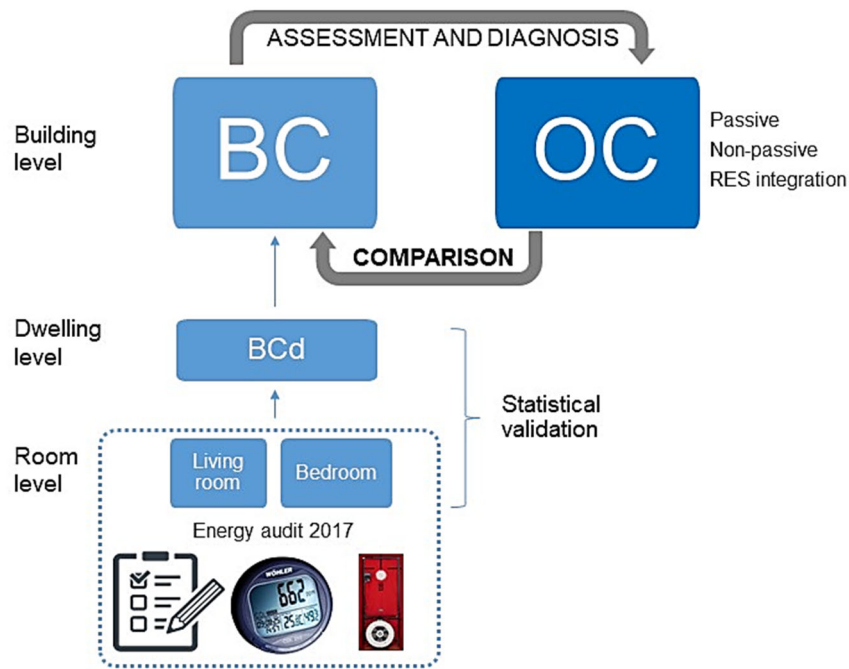


Fig. 46. Diagrama sobre la generación de los dos modelos energéticos del edificio caso de estudio: BC, edificio en su estado actual, y OC, edificio rehabilitado.

La validación estadística del modelo BCd se realizó comparando los resultados horarios de simulación sobre la temperatura de aire interior (IAT), en grados Celsius (°C), con los valores horarios promedio de IAT de salón y dormitorio medidos durante la campaña de monitorización de 2017. La comparación se llevó a cabo siguiendo el método descrito en la Sección 2 de esta tesis (ecuaciones 1, 2 y 3), basado en las directrices de la ASHRAE Guideline [143]. Una vez validado el segundo modelo a nivel de vivienda, se construyó el tercero (BC), que incluía las trece viviendas del edificio. En BC cada vivienda fue modelada como una zona térmica independiente.

Los datos de entrada sobre la envolvente se adoptaron de los modelos previamente validados (BCr, BCd), basados en la información recopilada en la auditoría de 2017, incluyendo la tasa de infiltración de aire ( $n_{50}$ ) y el valor de transmitancia térmica (U) de los elementos de la envolvente. Se asumió que todas las viviendas tenían el mismo sistema técnico de calefacción, refrigeración y producción de DHW que la vivienda monitorizada en 2017. El sistema de protección solar de los huecos, consistente en persianas tradicionales enrollables de madera colocadas por el exterior, se mantuvo para todas las viviendas en el modelo BC. En cuanto a los horarios de uso de este sistema de sombreado, se adoptó el propuesto como óptimo por León *et al.* [145] para un edificio residencial situado en Sevilla. Los autores cuantificaron la reducción de demanda energética conseguida con diferentes tipos de protecciones solares, incluyendo la de lamas horizontales existentes en el edificio caso de estudio. Encontraron que la menor demanda de energía anual se producía cuando el programa de apertura-cierre seguía un horario específico en el que las persianas estaban completamente cerradas de 0 a 24 horas, de mayo a septiembre,

y completamente abiertas de 0 a 24 horas entre octubre y abril, para las cuatro orientaciones solares. Las ganancias internas, las condiciones operativas de ocupación, iluminación y uso de aparatos eléctricos, así como de calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria, se adoptaron del CTE DB HE1 [159] vigente, para que los resultados de las diferentes viviendas fueran comparables. Los patrones de ventilación natural (tasa y horario) modelados fueron los deducidos de las investigaciones sobre perfil de uso en verano e invierno de 2017 (artículos 2 y 3), posteriormente validados en los modelos BC<sub>r</sub> y BC<sub>d</sub>. El resumen de los datos de entrada del modelo BC se muestra en la Tabla 10, comparándolos con los del modelo optimizado OC.

Los resultados de simulación del modelo BC (Fig. 47) fueron evaluado bajo tres criterios: (1) confort térmico interior, a escala de planta y de edificio; (2) balance de cargas térmicas, a escala de edificio; y (3) consumo de energía final (FE) y primaria (PE), a escala de edificio. En las dos primeras se siguió la misma metodología descrita en la Sección 2 de esta tesis. En cuanto al tercero, el consumo de PE, renovable y no renovable, se calculó aplicando los coeficientes de paso oficiales en España [160], al consumo de FE obtenido mediante simulación. Cuando la única fuente de suministro energético es la red eléctrica pública, como es el caso del edificio caso de estudio, estos coeficientes son:

$$2.007 = \frac{\text{Consumo PE no renovable (kWh)}}{\text{Consumo FE (kWh)}}$$

$$0.396 = \frac{\text{Consumo PE renovable (kWh)}}{\text{Consumo FE (kWh)}}$$

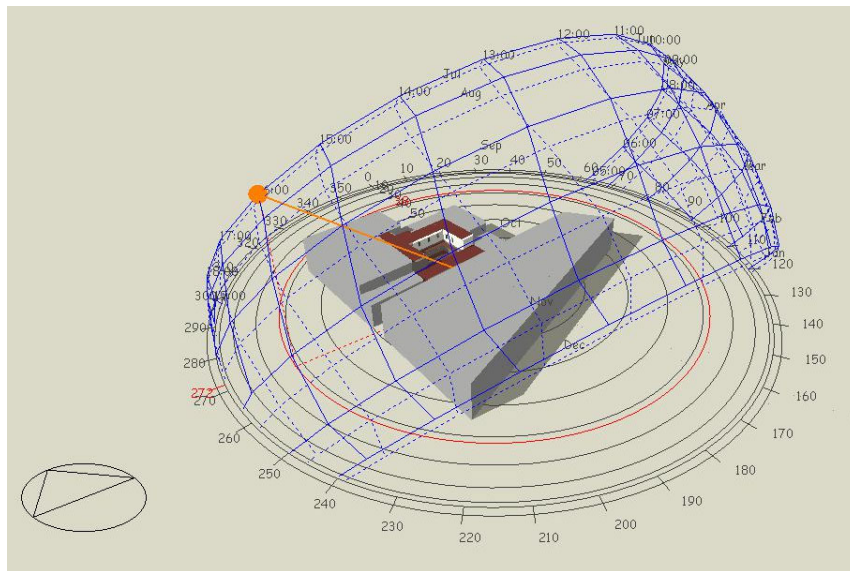


Fig. 47. Vista tridimensional del modelo de simulación energética.

Para la evaluación del confort térmico en el modelo BC se promediaron los resultados horarios de simulación de IAT del grupo de viviendas de cada planta. A éstos se les aplicaron los dos índices: (1) porcentaje anual de horas ocupadas fuera de confort (OHD, de la abreviación en inglés *Occupied Hours of Discomfort*); y (2) desviación media de la temperatura operativa de confort ( $T_{op}$ ). Los resultados se muestran en la Tabla 11 y la Fig. 48.

**Tabla 11**

Análisis de confort térmico durante 2017 en el modelo BC.

	Porcentaje anual de horas ocupadas fuera de confort			Desviación media IAT- T <sub>op</sub> (°C)	
	Total	Fresco	Caluroso	<21	>25
Planta 0	17%	0%	17%	0	1.1
Planta 1	20%	0%	20%	0	1.3
Planta 2	20%	0%	20%	0	1.9

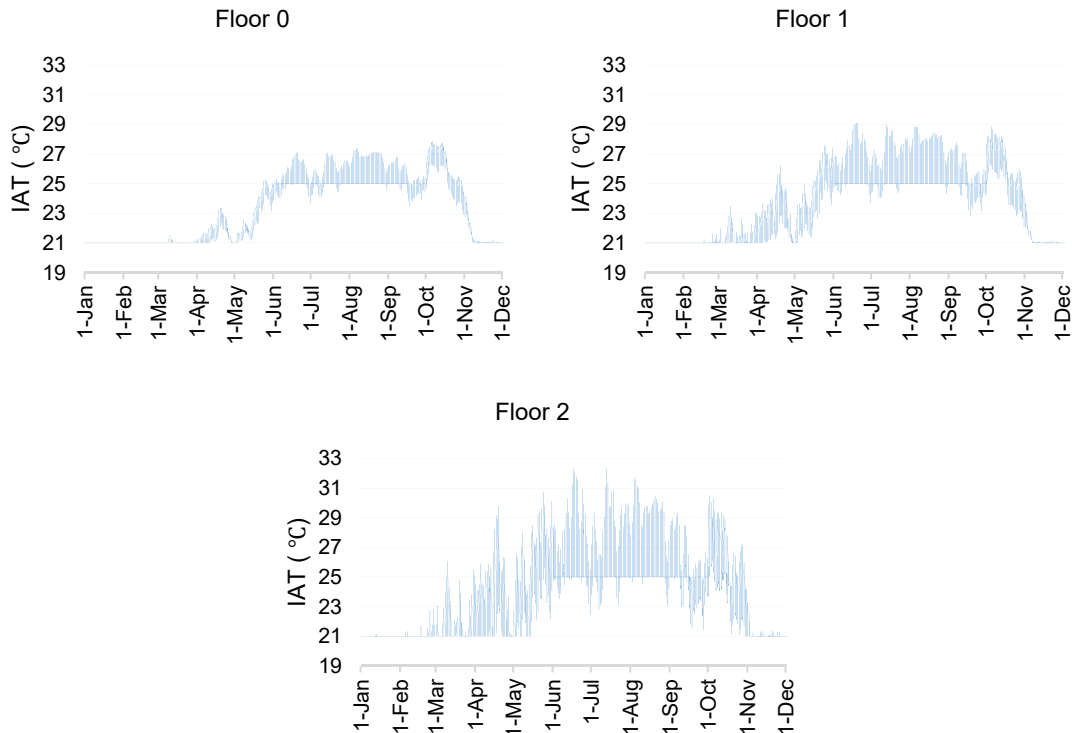


Fig. 48. Evolución horaria de las temperaturas interiores en las tres plantas del edificio en el modelo BC.

Los resultados de la Tabla 11 y la Fig. 48 muestran que, en el estado actual del edificio, la falta de confort en las viviendas es ocasionada por temperaturas demasiado altas y no demasiado bajas. Los perfiles de funcionamiento de la calefacción y la refrigeración simulados en el modelo son los propuestos por el CTE DB HE1. ¿A qué se debe entonces el casi 20% de horas anuales en las que el ambiente interior de las viviendas es demasiado caluroso, con una desviación media entre plantas de 1.4 °C? Los resultados mensuales a nivel de edificio lo pueden explicar. A escala de edificio, el nivel de bienestar térmico se midió mediante el índice Voto Medio Estimado (PMV, por su abreviación en inglés, *Predicted Mean Vote*) siguiendo las normas UNE- EN 16798-1 [138] y EN ISO 7730 [161]. Las condiciones de diseño se muestran en la Tabla 12 y los resultados en la Fig. 49.

**Tabla 12**

Valores de diseño para la evaluación del bienestar térmico en el modelo BC

	Aislamiento ropa (clo)	Tasa metabólica (met)	Velocidad aire (m/s)
Invierno	1	1.2	0.10
Media estación	0.8	1.2	0.15
Verano	0.5	1.2	0.15

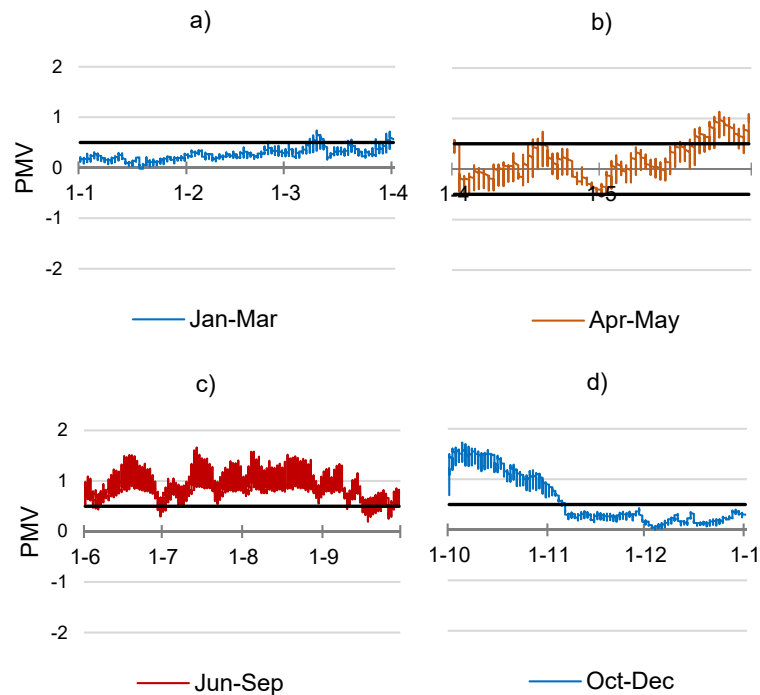


Fig. 49. Evolución horaria a lo largo del año del índice PMV a escala de edificio: invierno (a, d), media estación (b) y verano (c). El límite recomendado en la norma EN ISO 7730 para edificios de Categoría II ( $-0.5 < PMV < +0.5$ ) aparece marcado en línea negra gruesa.

Se identificaron dos periodos excesivamente calurosos. El primero corresponde al mes de octubre completo, sobre todo entre las 12 y las 24 horas, y el segundo corresponde al periodo entre el 15 de mayo y el 15 de septiembre, sobre todo en el tramo horario entre las 11 y las 14 horas. En el caso del mes de octubre, los perfiles de uso de la climatización del CTE DB HE1 no parecen ajustarse a la realidad climática de Sevilla, porque este mes es considerado de calefacción, a pesar de que las temperaturas del aire exterior (OAT) medias y máximas diarias de 2017 fueron de 24 °C y 31 °C, respectivamente, haciendo más necesaria la refrigeración. En la segunda quincena de mayo, el CTE DB HE1 no establece refrigeración a pesar de que en 2017 se alcanzaron máximas de 35 °C (ver Fig. 18 en Sección 2). Por último, el malestar térmico estival se produce en la franja horaria entre las 11 y las 15 horas, cuando el funcionamiento de la refrigeración no está contemplado por el CTE DB HE1, a pesar de que la ocupación sí es considerada.

En conclusión, para lograr las condiciones de bienestar térmico de las viviendas, conservando las temperaturas de consigna del CTE DB HE1, el funcionamiento de la refrigeración mecánica debe ampliarse a los meses de octubre y mayo. Entre junio y septiembre, su horario de funcionamiento diurno debe comenzar a las 11 h, en lugar de a las 15 h, como aparece en el CTE DB HE1. Este diagnóstico sobre periodos y horarios de refrigeración concuerda con las predicciones de la *European Environment Agency* de 2017 [139], según las cuales “el cambio climático está reduciendo la demanda de calefacción y aumentando la demanda de refrigeración, tanto a nivel mundial como en Europa”, lo que invita a reflexionar sobre la necesidad de la inclusión de los correspondientes cambios en los perfiles de climatización estandarizados.

En cuanto al balance de cargas térmicas a escala de edificio, los resultados del modelo BC (Figs. 50 y 51) fueron coherentes con los obtenidos para las viviendas individuales analizadas en la Sección 2 de esta tesis. Éstos revelan que todos los elementos de la envolvente, a excepción de la solera de planta baja, tienen un impacto negativo en el balance de cargas, tanto en verano como en invierno. En el balance anual, muros, acristalamiento y cubierta son, por este orden, los responsables de la mayoría de los efectos desfavorables. En cuanto a los factores relativos al uso, el perfil de ventilación natural simulado (1.5 ac/h de forma continua durante las noches de verano y 1 hora al día a primera hora de la mañana durante el resto del año) tiene un efecto positivo en el balance térmico del verano y un efecto negativo moderado en el del invierno y las estaciones intermedias.

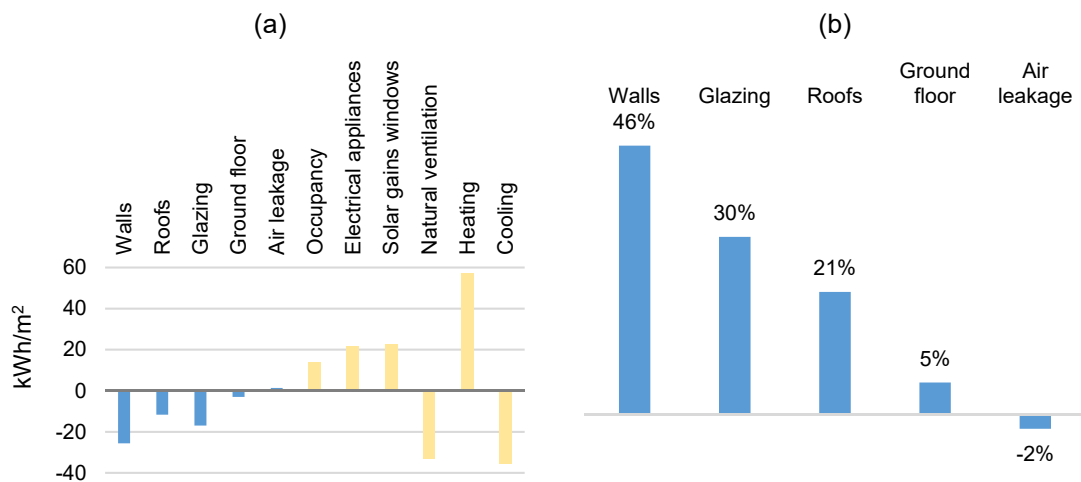


Fig. 50. A la izquierda (a), cargas térmicas del edificio en el año 2017 normalizadas por superficie. A la derecha (b), porcentaje de contribución de cada elemento de la envolvente a las pérdidas térmicas totales anuales.

El hecho de que en invierno las viviendas se encontraron en condiciones de confort (Tabla 11 y Fig. 48), significa que la calefacción fue capaz de compensar las considerables pérdidas producidas por la alta transmitancia de muros, vidrios, cubierta y solera. El consumo de FE y PE derivado fue, sin embargo, muy desfavorable. Según los resultados de simulación, en el escenario BC, el edificio consumió una electricidad neta anual de 36,672 kWh (64 kWh/m²), lo que equivale a un consumo anual de PE total de 150 kWh/m² y a un consumo anual de PE no renovable de 129 kWh/m². Ambos valores duplican los límites máximos impuestos por la actual legislación en la rehabilitación de edificios residenciales no catalogados localizados en la zona climática B4.

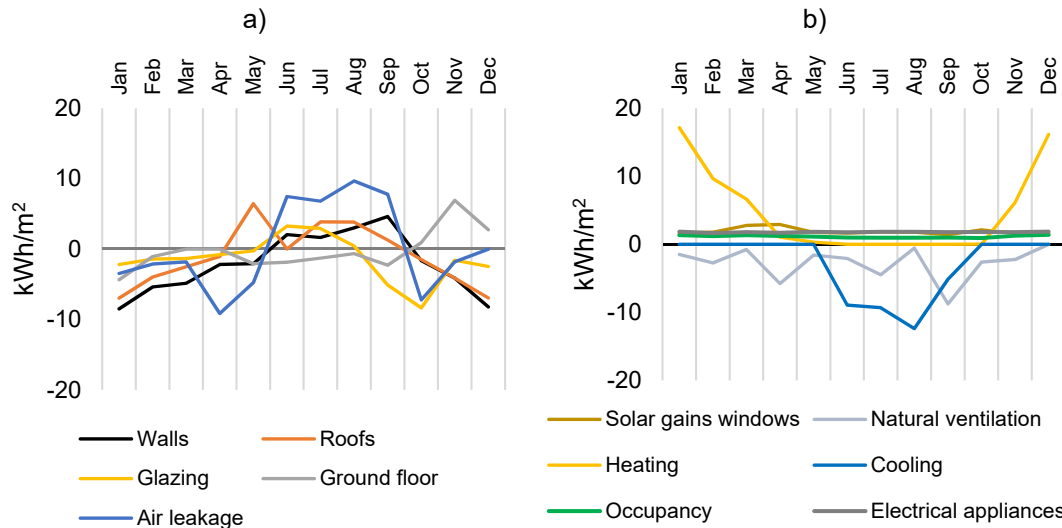


Fig. 51. Evolución mensual de cargas térmicas relacionadas con la envolvente (a) y con el comportamiento de los residentes (b). El cálculo se refiere al edificio completo para las condiciones climáticas del año 2017.

A modo de diagnóstico del escenario BC, que representa el estado actual del edificio, podemos concluir que, si la calefacción y la refrigeración funcionan según el perfil estándar de horarios del CTE DB HE1, se observa un importante malestar térmico desde la segunda quincena de mayo hasta octubre, mientras que el consumo anual de PE es el doble del valor máximo permitido para edificios no protegidos. La inadecuación de los perfiles de uso y operacionales de calefacción y/o refrigeración sólo requiere un simple ajuste, mientras que reducir el consumo de PE es más complicado. Se requiere, **primero**, disminuir la demanda energética y, **segundo**, sustituir los ineficientes sistemas de climatización, grandes consumidores de electricidad, por unos de mayor eficiencia que integren fuentes de energía renovable.

En lo referente al **primer factor**, la disminución de la demanda, ésta exige mejorar las prestaciones térmicas de la envolvente, modificándola para reducir el valor de U de muros, ventanas y cubierta, así como la tasa de infiltración de aire. Las normas de protección del patrimonio a las que está sometido el edificio limitan las posibilidades de aislamiento de los muros de fachada, como se mencionó anteriormente. Sí pueden aislarse los muros exteriores de los patios de manzana, no protegidos, aunque es de esperar un resultado pobre porque su superficie sólo representa el 23% del total del cerramiento exterior del edificio. No obstante, existe un amplio margen de mejora del valor U de la cubierta y de los vidrios, que son intervenciones permitidas por las ordenanzas locales para edificios catalogados C y D. La reducción de las infiltraciones de aire exterior exige la sustitución de las carpinterías existentes por otras con un nivel de estanqueidad al paso del aire que cumpla el límite máximo impuesto en el CTE DB HE1 a los edificios no protegidos en la zona de severidad climática de invierno B ( $\leq 27 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ ). Sin embargo, su efecto podría ser perjudicial. Como han señalado Fernández-Agüera *et al.* [162] y Underhill *et al.* [163], en los edificios residenciales que sólo cuentan con fuentes naturales de ventilación, el aumento de la estanqueidad al aire derivado de la mejora de las carpinterías

produce un incremento en la concentración de CO<sub>2</sub>, especialmente durante el invierno. Este efecto desfavorable ha sido también registrado por la autora de esta tesis y su director en una de las viviendas analizadas en la investigación, en la que las carpinterías de la fachada principal habían sido sustituidas por nuevas de gran estanqueidad (Sección 2, Caso 4, artículo 3 [106]). Además, una tasa de renovación de aire insuficiente provocada por una envolvente muy estanca en una vivienda sin ventilación mecánica puede ocasionar, en climas cálidos con inviernos templados, un aumento de la humedad relativa del aire interior de las viviendas, del riesgo de aparición de condensaciones y del crecimiento de moho [164], [165], [166]. Por lo tanto, la reducción de infiltraciones a través de la envolvente debe ir necesariamente acompañada de un flujo constante de aire limpio que contrarreste la pérdida ocasionada. La implementación de un sistema de ventilación mecánica, de acuerdo a las exigencias establecidas como obligatorias en España en la rehabilitación integral de edificios no protegidos, CTE DB HS3 [167], es necesaria para garantizar la adecuada calidad de aire interior.

En cuanto al **segundo factor**, relativo a la intervención en los sistemas térmicos del edificio, es necesario que éstos sean muy eficientes y que estén alimentados, al menos parcialmente, por fuentes de energía renovable, si pretendemos que el edificio cumpla los límites de consumo de PE exigidos a los edificios no protegidos.

En vista de este diagnóstico, en el modelo OC se simularon las siguientes medidas de mejora, cuyos detalles técnicos se detallan en las Tablas 13, 14 y 10:

**M1.** Modificación de los perfiles de uso y operacionales establecidos en el CTE DB HE1, ampliándose el periodo de refrigeración desde mayo hasta octubre. En verano, el horario de refrigeración se amplía a la franja horaria entre las 11 y las 24 horas, en lugar de la estándar entre las 15 y las 24 horas. Los nuevos periodos y horarios se resumen en la Tabla 13.

**M2.** Colocación de aislamiento térmico en muros exteriores de patios de manzana y cubierta para reducir los valores de U hasta los límites reglamentarios ( $U_{\text{muro}} < 0.56 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $U_{\text{cubierta}} < 0.44 \text{ Wm}^2/\text{K}$ ).

**M3.** Colocación de nuevo acristalamiento doble (con control solar en las aberturas orientadas al sur y al oeste) en todos los huecos, en combinación con carpinterías de alta estanqueidad (Clase 2 de  $Q_{100\text{lim}} = 27 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ ), para reducir el valor U de las ventanas hasta el límite reglamentario ( $U_{\text{ventana}} < 2.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).

**M4.** Reducción de la tasa de infiltración de aire ( $n_{50}$ ) al límite reglamentario aplicable en la rehabilitación de edificios no protegidos.

**M5.** Implementación de un sistema mecánico de ventilación (MVS por *Mechanical Ventilation Sytem*) de flujo constante, siguiendo la normativa nacional [167] para edificios no protegidos, y con recuperador de calor.

**M6.** Implementación de un *sistema energético híbrido* para la producción de energía térmica de climatización y producción de DHW que integra fuentes de energía de origen renovable con electricidad de la red pública.

**Tabla 13**

Operación de la climatización en los modelos BC y OC

Horario		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
Calefacción	BC	0-24h					-	-	-	-	-	0-24h		
	OC	0-24h					-	-	-	-	-	-	0-24h	
Refrigeración	BC	-	-	-	-	-	0-7h, 15-24h				-	-	-	
	OC	-	-	-	-	0-24h	0-7h, 11-24h				0-24h	-	-	
Temperaturas interiores de consigna														
Calefacción	0-7h: 17°C, 7-23h: 21 °C, 23-24h: 17 °C													
Refrigeración	0-7h: 27°C, 7-23h: 25 °C, 23-24h: 27 °C													

**Tabla 14**Transmitancia térmica (W/m<sup>2</sup>K) de los elementos de la envolvente en los modelos BC y OC

	BC	OC
Muros protegidos (planta baja y primera)	0.75	0.75
Muros protegidos (planta segunda)	2.26	2.26
Muros no protegidos (en patios de manzana)	2.26	0.53 (*)
Cubierta	3.10	0.4 (**)
Huecos de muros protegidos		
Carpintería	1.90	1.49
Vidrio	5.78	2.51
Ventana	6.96	2.31
Huecos de muros no protegidos		
Carpintería	5.88	2.00
Vidrio	5.78	1.76
Ventana	5.80	1.83
Solera en planta baja	1.90	1.90

(\*) Aislados con lana de roca ( $\lambda=0.031$  W/mK,  $\delta=40$  kg/m<sup>3</sup>, 4 cm espesor) por la cara exterior(\*\*) Aislada con lana de roca ( $\lambda=0.035$  W/mK,  $\delta=150$  kg/m<sup>3</sup>, 6 cm espesor)

El modelo OC representa, por tanto, un edificio en el que:

1. Los programas de climatización se ajustan a la demanda real de confort.
2. Las prestaciones térmicas de la envolvente han sido mejoradas hasta la máxima capacidad posible, teniendo en cuenta las limitaciones impuestas por las normas de protección de patrimonio que afectan al edificio.
3. La calidad del aire interior se garantiza mediante la correcta programación de la ventilación natural y mecánica.
4. El consumo de PE es lo más cercano posible a los límites máximos fijados por el CTE DB HE0, gracias a la implementación de un *sistema energético híbrido* para la producción de energía térmica. Este sistema ha sido diseñado para que su implantación en el edificio no provoque conflicto con la normativa de protección paisajística relativa al entorno de la Iglesia de San Gil, y tampoco con la posible conservación de los restos arqueológicos existentes en la parcela.

Un *sistema energético híbrido* (medida M6) es aquel capaz de combinar fuentes de energía renovable con dispositivos eléctricos de alta eficiencia. En Europa, este tipo de soluciones han ido progresivamente ganando protagonismo en la última década. Ello está parcialmente causado por la evidente ventaja que presentan ante la progresiva descarbonización de las matrices energéticas nacionales, en los que la contribución de las fuentes de energía renovable está



umentando en todo el mundo. Según el informe de la *International Energy Agency* (IEA) [168], en 2019, la participación de renovables alcanzó casi el 27% de media en el mundo. En España, las fuentes bajas en carbono (renovables y nuclear) representaron el 43.6% de toda la electricidad producida en 2020, su mayor cuota desde que se iniciaron los registros en 2007 [114]. Actualmente existen una gran variedad de sistemas energéticos híbridos apropiados para la descarbonización de edificios localizados en zonas de clima mediterráneo [169], [170].

Una de las tecnologías más desarrolladas es la basada en bombas de calor (HP por la abreviación en inglés de *Heat Pump*) eléctricas, que requieren menos cantidad de energía eléctrica para funcionar que la energía térmica que producen. En el contexto de una matriz eléctrica baja en carbono, las HP reducen significativamente el consumo de energía primaria y las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Su rendimiento y eficiencia han aumentado notablemente en los últimos años debido a la mejor integración de los sistemas y a las nuevas tecnologías y componentes, lo que, a su vez, ha impulsado la investigación en la materia [171–175]. La HP de utilización más común en las zonas de clima mediterráneo es la bomba de calor de aire reversible, que funciona tanto para calefacción como para refrigeración (ASrHP por la abreviación en inglés de *Air-Source Heat Pump, reversible*). Produce energía en el mismo edificio, utilizando el calor almacenado en el aire exterior, siempre disponible y renovable, a un coste relativamente bajo y con un excelente rendimiento a carga parcial [176], [177]. Las ASrHP son especialmente adecuadas para la rehabilitación de viviendas históricas, ya que requieren un espacio mínimo, son fáciles de instalar y son compatibles con la normativa de protección arqueológica y paisajística. Los sistemas híbridos basados en la tecnología de HP fueron inicialmente considerados como una estrategia de descarbonización del sector de la calefacción en climas fríos. Sin embargo, su aplicación a climas templados está cada vez despertando mayor interés [169,170,178–180]. Apenas existe literatura científica sobre su comportamiento en sistemas integrados de producción de la totalidad de la energía térmica anual (calefacción, refrigeración y DHW), como parte de la estrategia de rehabilitación de edificios residenciales históricos en clima mediterráneo.

**Tabla 10**

Datos de entrada en los modelos energéticos BC y OC

Modelo energético	BC	OC
<b>Actividad</b>		
Densidad de ocupación		0.03 per/m <sup>2</sup>
Factor metabólico		0.9
Horario de ocupación		CTE DB HE1
<b>HVAC</b>		
<b>Calefacción</b>		
Tipo	HP eléctrica	ASrHP + EWH (*)
Eficiencia (COP)	COP = 2.50	COP = 3.76
Temperatura interior de consigna	21 °C/ 17 °C	21 °C/ 17 °C
Periodo de funcionamiento	Ene-May, Oct-Dic	Ene-May, Nov-Dic
Horario	CTE DB HE 1 (Tabla 13)	Tabla 13
<b>Refrigeración</b>		
Tipo	HP eléctrica	ASrHP + EWH
Eficiencia (EER)	EER = 2.60	EER= 3.67
Temperatura interior de consigna	25 °C/ 27 °C	25 °C/ 27 °C
Periodo de funcionamiento	Ene-Set	Abr-Oct
Horario	CTE DB HE 1 (Tabla 13)	Tabla 13
<b>Agua caliente sanitaria</b>		
Tipo	EWH	ASrHP + EWH
Temperatura interior de consigna	60 °C	60 °C
Temperatura media anual entrada	16 °C	16 °C
Horario de demanda diaria	6-24 h	6-24 h
Caudal demanda diaria (edificio)	1.4 l/m <sup>2</sup> día	1.4 l/m <sup>2</sup> día
Caudal instantáneo	0.0042 m <sup>3</sup> /s	0.0042 m <sup>3</sup> /s
Eficiencia	0.9	0.9
<b>Ventilación</b>		
<i>Natural</i>		
Tasa	Apertura de ventanas 1.5 ac/h	Apertura de ventanas 1.5 ac/h
Periodo de funcionamiento	Todo el año	Jun-Set
Horario	Ene-May, Set-Dic (7-8h), Jun-Set (0-8h)	0-7h
<i>Mecánica</i>		
Caudal constante por vivienda		0.7 ach <sup>-1</sup>
Periodo de funcionamiento		Todo el año
Horario		0-24 h
Recuperador de calor	No	Sí. Entálpico. Eficiencia 85%
Eficiencia ventiladores		92%
Consumo energía auxiliar		2.79 W/m <sup>2</sup>
Control de humedad		No
<b>Iluminación y aparatos eléctricos</b>		
Potencia instalada		2 + 2 W/m <sup>2</sup>
Periodo de funcionamiento		Todo el año
Horario		CTE DB HE 1
<b>Sombreado de ventanas</b>		
Sistema	Por el exterior. Lamas horizontales de madera. Enrollable.	
Funcionamiento	May-Set siempre ON, Oct-Apr siempre OFF	
<b>Infiltraciones aire a 50 Pa: n<sub>50</sub> (h<sup>-1</sup>)</b>	7.71 (medido)	3.71 (calculado CTE)

(\*) ASrHP+EWH: Sistema híbrido compuesto por una bomba de calor de aire eléctrica, reversible, y un calentador de agua eléctrico.

La cantidad de energía renovable utilizada por una ASrHP depende de su eficiencia, que varía de hora en hora en función principalmente de las condiciones climáticas locales y se mide mediante el factor de rendimiento estacional (SPF por la abreviación en inglés de *Seasonal Performance Factor*). La Unión Europea determinó en 2013 [181] que una HP eléctrica puede ser considerada un sistema energético renovable siempre que su SPF sea superior a 2.5. Además, los fabricantes deben calcular el SPF de sus dispositivos según la norma

EN14825:2012 [182]. Sin embargo, aunque cuenten con el nivel de eficiencia exigida, las HP eléctricas presentan algunas deficiencias cuando funcionan solas y se pretenden que abastezcan la totalidad de la demanda térmica de las viviendas. En primer lugar, cuanto mayor es la diferencia entre la temperatura del aire exterior y la del fluido de salida (aire o agua), menor es su capacidad y su eficiencia, lo que ocurre en los periodos más fríos y calurosos del año, cuando la climatización es más necesaria. En estos momentos su consumo puede resultar excesivo. En segundo lugar, una ASrHP no es capaz de cubrir la demanda total de DHW durante todo el año en edificios residenciales, lo que hace necesario implementar un volumen de almacenamiento de agua que equilibre las cargas necesarias [176]. Esta desventaja puede solventarse mediante la integración de un generador auxiliar de energía unido a un depósito de agua, que funcione cuando la capacidad de la ASrHP no es suficiente para cubrir la demanda o cuando su funcionamiento resulta poco económico o anti-ecológico. Esta ha sido la solución adoptada en esta investigación.

El rendimiento de una ASrHP depende en cada instante de la temperatura del aire exterior, de la temperatura de suministro y de la carga térmica. En consecuencia, los cálculos deben realizarse por horas, utilizando datos climáticos locales fiables y herramientas de simulación energética dinámica. Por ello, en esta investigación se utilizaron datos meteorológicos horarios de 2017 de AEMET [118] y el sistema híbrido completo se modeló en *Energy Plus 8.9* en lenguaje EMS, al igual que en [183] y [180]. El sistema se ajustó a los datos proporcionados por el fabricante sobre calificación energética, capacidad y consumo eléctrico de los dispositivos, a diferentes temperaturas de suministro de aire exterior y de agua fría, así como a diferentes ratios de carga parcial.

La cantidad de PE no renovable consumida por una ASrHP depende de la proporción de renovables de la matriz energética nacional. Esta proporción varía cada hora en función de las condiciones meteorológicas, lo que hace especialmente difícil medir el ahorro con precisión. Para calcular el consumo de PE no renovable de un sistema híbrido basado en la tecnología de una ASrHP existen dos métodos. Uno de alta resolución, como el propuesto por Jarre *at al.* [173], que requiere el establecimiento de hipótesis específicas sobre la eficiencia de conversión de las centrales que suministran a la red eléctrica. El segundo, empleado en esta investigación, utiliza un factor de conversión (PEF, por la abreviación en inglés de *Primary Energy Factor*) que es una media anual de la cantidad de PE no renovable contenida, en cada hora, en el sistema de generación, específica de cada país [184]. En España el valor de PEF es establecido por el Gobierno de forma conservadora en periodos de siete años, para hacerlo depender de la estructura de generación y no de las condiciones climáticas de cada año [160]. Según los registros oficiales [114], en 2016 las cuotas de renovables y no renovables en la matriz energética española fueron del 40.8% y del 59.2%, respectivamente. En 2017, año utilizado para las simulaciones de este trabajo, la cuota de renovables disminuyó hasta el 33.7%. Este desajuste es asumido por la autora de esta tesis en el cálculo de la energía primaria consumida por el edificio caso de estudio.

El sistema híbrido propuesto en esta investigación se compone de tres sub-equipos independientes aire-agua, uno para cada planta del edificio. El primero y el segundo se dimensionaron para alimentar a cinco viviendas cada uno, mientras que el tercero para abastecer a las tres viviendas existentes en la tercera planta. El esquema de cada sub-equipo se representa en la Fig. 52. Los parámetros de entrada del modelo del sistema híbrido y sus valores, así como las capacidades nominales de la HP, se resumen en la Tabla 15.

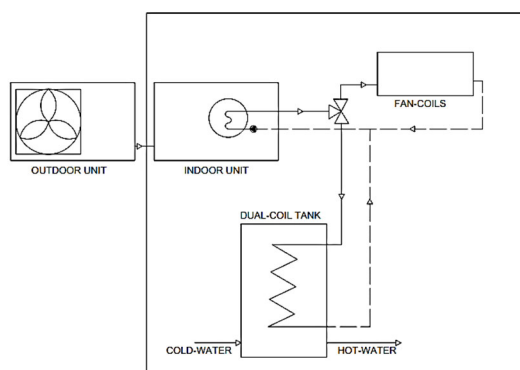


Fig. 52. Esquema del sistema híbrido propuesto.

**Tabla 15**

Datos de entrada para la simulación del sistema híbrido en el modelo OC

<b>ASrHP unidades exteriores</b>	
<b>Calefacción</b>	
Tipo de caudal	Variable
Horario	On 24/7
Temperatura nominal salida de agua	55 °C
Temperatura mínima aire de entrada	-10 °C
Capacidad nominal	6,800 W
COP	3.76
<b>Refrigeración</b>	
Tipo de caudal	Variable
Horario	On 24/7
Temperatura nominal salida de agua	7 °C
Temperatura referencia aire de salida	29.4 °C
Capacidad nominal	6,100 W
EER	3.67
<b>ASrHP unidades interiores (fan coils)</b>	
<b>Calefacción</b>	
Temperatura aire de salida	35 °C
Factor de dimensionado	1.25
<b>Refrigeración</b>	
Temperatura de aire de salida	14 °C
Factor de dimensionado	1.15
<b>EWH</b>	
Temperatura del agua de entrada	Evolución mensual según Anexo G de CTE DB HE1 [159]. En Sevilla media anual de 16 °C.
Temperatura del agua de salida	60 °C
Eficiencia	0.9
Caudal instantáneo mínimo	
Plantas 0 y 1	0.0042 m <sup>3</sup> /s
Planta 2	0.0025 m <sup>3</sup> /s
Horario	6-24 h

Una vez introducida la información de entrada, desde *Energy Plus* se descargaron y analizaron los siguientes datos horarios, en vatios, para cada planta y un año completo: (1) demanda de calefacción, de refrigeración y de DHW, por separado; (2) producción de energía para calefacción; (3) producción de energía para refrigeración; (4) producción de energía para DHW; (5) consumo eléctrico de EWH; y (6) consumo eléctrico de los sistemas auxiliares (ventiladores, bombas y compresor).

Se observó que, durante los periodos inter-estacionales, en los que las temperaturas exteriores presentan grandes variaciones dentro del mismo día y de una semana a otra, la capacidad de la ASrHP variaba en consecuencia y la producción de DHW presentaba patrones intermitentes. Se estudió la evolución de todos los parámetros en días concretos representativos, así como su evolución a lo largo de las diferentes estaciones y en el año completo. Además, se calculó la eficiencia media mensual de las tres ASrHP, juntas y por separado, para establecer en qué parte del año la eficiencia del sistema y el ahorro de energía fósil fueron mayores. También se calculó el SPF, confirmando que supera con creces el valor mínimo establecido por la Unión Europea para ser considerado un sistema renovable. Por último, se calcularon desglosados los consumos de energía final y primaria para los diferentes usos, térmicos y no térmicos, del edificio en su estado OC, siguiendo el diagrama de la Fig. 53. Estos consumos se compraron con los del edificio en estado BC y con los límites reglamentarios impuestos por el CTE DB HE0.

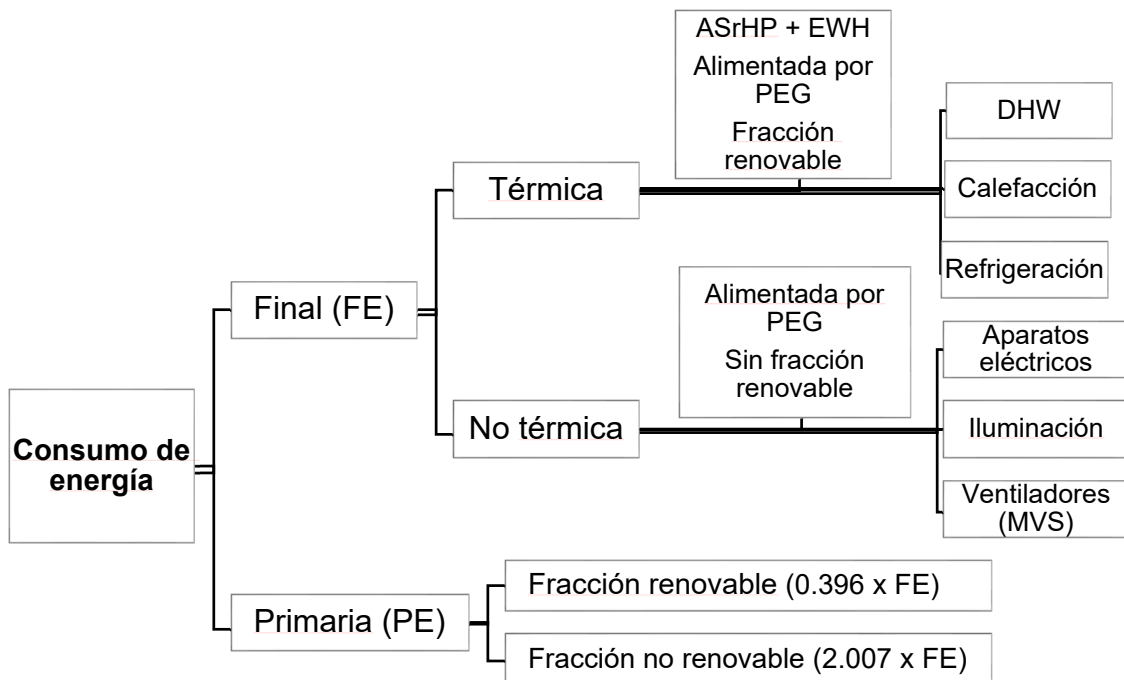


Fig. 53. Esquema de cálculo del consumo de energía en los modelos BC y OC.

En la Fig. 54 se representan los resultados del funcionamiento del sistema híbrido en días representativos de invierno en la planta baja (Fig. 54a), de verano en la planta primera (Fig. 54b) y de primavera en la planta primera (Fig. 54c). Cuando la calefacción está programada durante

todo el día, el sistema suministra energía suficiente para cubrir su demanda y la de DHW (Fig. 54a), haciendo innecesaria la activación del EWH. En el periodo estival, desde junio hasta septiembre, la refrigeración está programada entre las 11 y las 24 horas, lo que hace necesario que el EWH funcione entre las 6 y las 11 horas para satisfacer la demanda de DHW (Fig. 54b). En primavera, la demanda de refrigeración se reduce a un tercio de la de verano y el sistema híbrido no alcanza a cubrir la demanda de DHW de primera hora de la mañana, lo que acciona el EWH. La demanda de refrigeración se cubre totalmente con la bomba de calor a partir de las 11h (Fig. 54c).

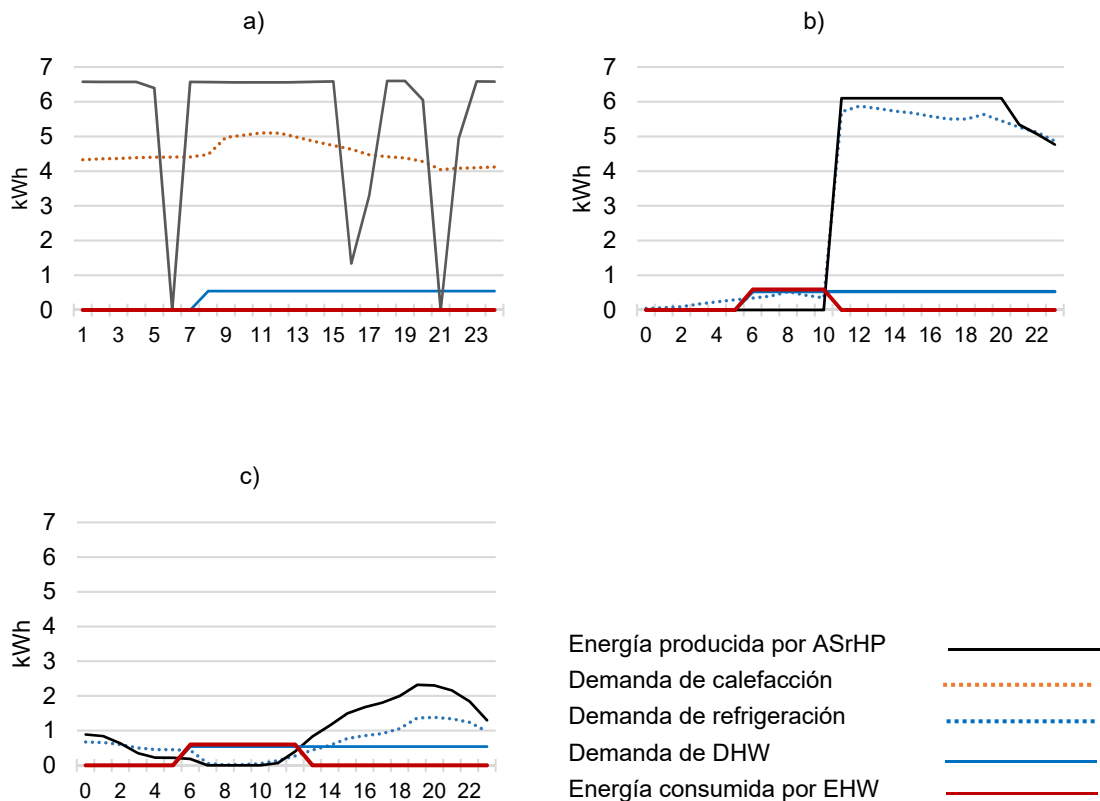


Fig. 54. Comportamiento del sistema híbrido en tres días representativos de invierno en la planta baja (a), de verano en la planta primera (b) y de primavera en la planta primera (c).

El análisis mensual se realizó a nivel de edificio, comparando la energía consumida y producida por los tres sistemas conjuntamente (Fig. 55). La eficiencia mensual media de las tres ASrHP se representa en la Fig. 56, mostrando que éstas funcionan de forma muy eficiente, especialmente en los meses más fríos. El rendimiento de las diferentes ASrHP instaladas en cada planta se representa en la Fig. 57: por meses (Fig. 57a) y para todo el año (Fig. 57b). El SPF medio calculado para los tres sistemas es de 4.71, muy por encima del mínimo aceptado por la Unión Europea ( $SPF > 2.5$ ) para que una bomba de calor sea considerada como una tecnología de energía renovable [181]. La eficiencia más baja se registra en mayo y septiembre, y la más alta en enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre, tanto a nivel de planta como de edificio. De junio a agosto, el valor de la eficiencia a nivel de edificio se sitúa en torno a 3. Los dos escenarios

más desfavorables se encuentran en septiembre, en la planta 0, y en mayo, en la planta 2, cuando la eficiencia baja a 1.74 y 2.40, respectivamente.

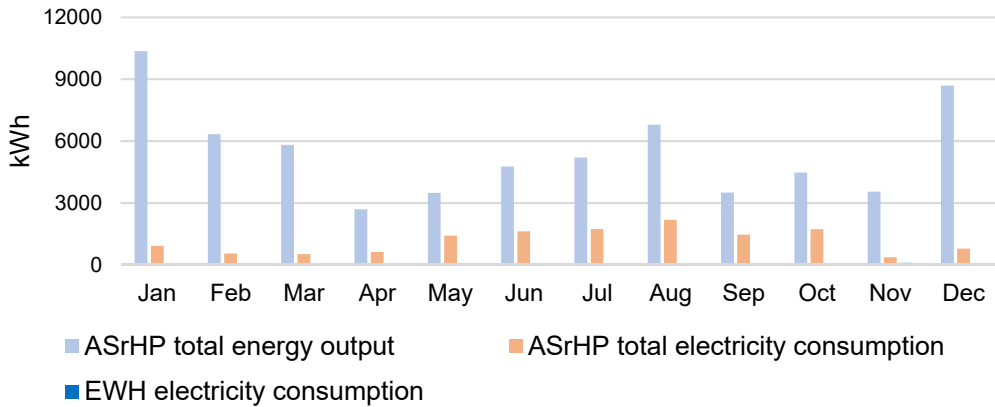


Fig. 55. Evolución mensual de la energía producida y consumida por el sistema híbrido completo, incluyendo las tres plantas del edificio.

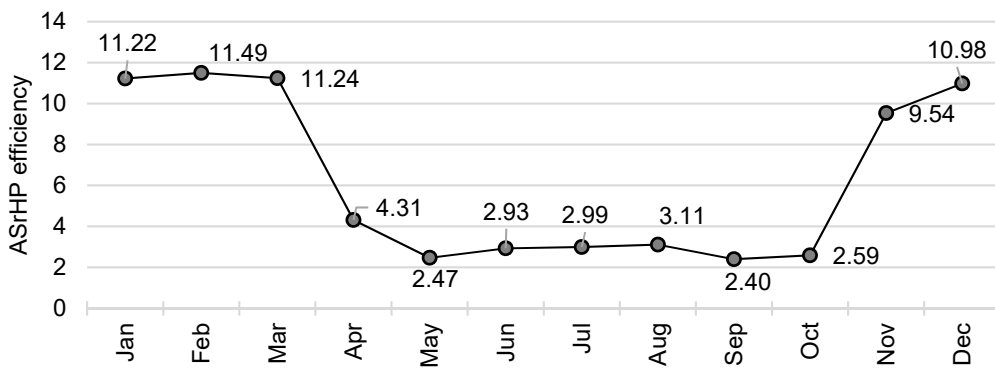


Fig. 56. Eficiencia mensual media de las tres bombas de calor.

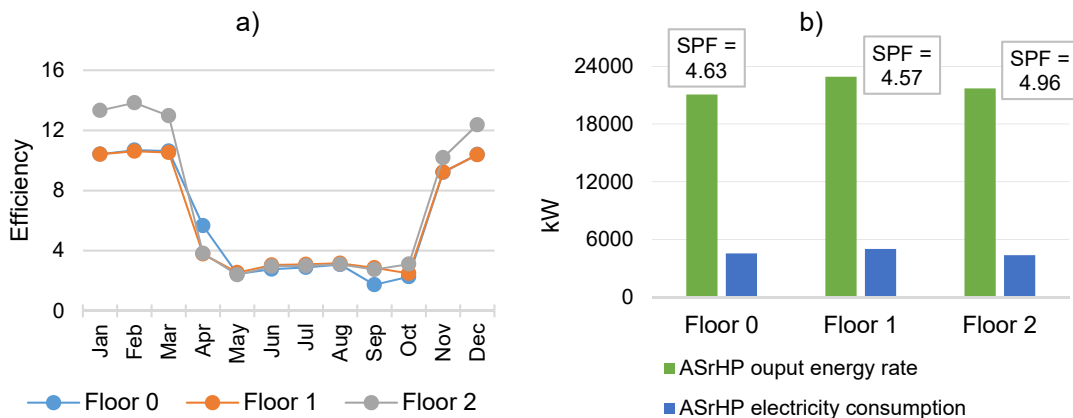


Fig. 57. Eficiencia mensual (a) y SPF (b) de las bombas de calor instaladas en cada planta del edificio caso de estudio.

El agua caliente sanitaria se produce de manera renovable cuando, habiendo demanda, la climatización está en funcionamiento (si no, la demanda se cubre con el EWH) y/o la demanda energética de la climatización es mayor que de DHW (en caso contrario, el agua se calienta también con el EWH). El patrón de producción de DHW se analizó para todo el año de forma horaria, separando las horas en las que el agua era calentada por la ASrHP de aquellas en las que era calentada por el EWH. El resultado muestra que durante el 63% de las horas del año analizadas, el DHW es producido por la bomba de calor y, por tanto, por energía renovable. La relación entre la demanda de calefacción/refrigeración y la producción de DHW para cada mes se representa en la Fig. 58.

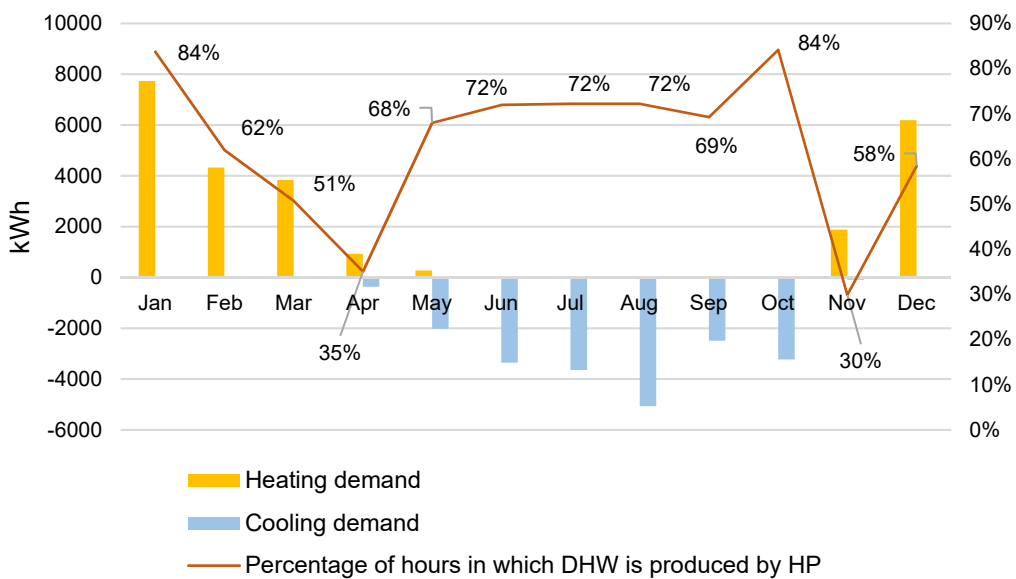


Fig. 58. Porcentaje de horas en que el agua caliente se produce de manera renovable mediante la bomba de calor (línea anaranjada) en relación a la evolución mensual de demanda de calefacción y refrigeración en el modelo OC.

Los resultados sobre consumo de energía final anual en el edificio (Tabla 16) indican que:

- El 70% de la energía final térmica consumida por el edificio es producida por la ASrHP y el 30% restante es suministrado por la red pública de electricidad.
- Una proporción considerable (el 26%) de la energía final térmica total es consumida por los sistemas auxiliares necesarios para el funcionamiento del sistema híbrido (bombas y ventiladores).
- La energía final consumida para refrigeración es mucho mayor que la de calefacción.
- La energía final consumida para calentar agua es muy baja, ya que la mayor parte de las horas el agua es calentada por la ASrHP, que funciona de manera muy eficiente.

La comparación de resultados sobre demanda, consumo y producción de energía en los escenarios BC y OC del edificio se presenta en la Tabla 17 y las Fig. 59 y 60.



**Tabla 16**

Desglose de consumo de energía final anual por usos térmicos en modelo OC (kWh)

Fuente de energía	Sistema	Consumo de FE	Porcentaje del total
Aire	ASrHP (calefacción y DHW)	2,306	16%
	ASrHP (refrigeración y DHW)	7,818	54%
	<b>Total ASrHP</b>	<b>10,124</b>	<b>70%</b>
PEG	EWH	615	4%
	Sistemas auxiliares	3,809	26%
	<b>Total PEG</b>	<b>4,424</b>	<b>30%</b>
<b>Total energía final</b>		<b>14,548</b>	

**Tabla 17**

Resumen anual de demanda, generación y consumo de energía en los escenarios BC y OC del edificio caso de estudio (kWh)

		Demanda de energía					Energía producida	FE consumida	PE consumida	
		Térmica			No térmica		Total demanda	Total	Total	Total
		DHW	Calefacción	Refrigeración	Iluminación y aparatos	Ventiladores (MVS)				
BC	Subtotal	1,780	32,678	20,430	12,260	0	67,148	0	36,672	88,123
			54,888		12,260					
OC	Subtotal	1,780	25,245	20,240	12,260	1,235	60,760	65,685	28,410	51,432
			47,265		13,495					

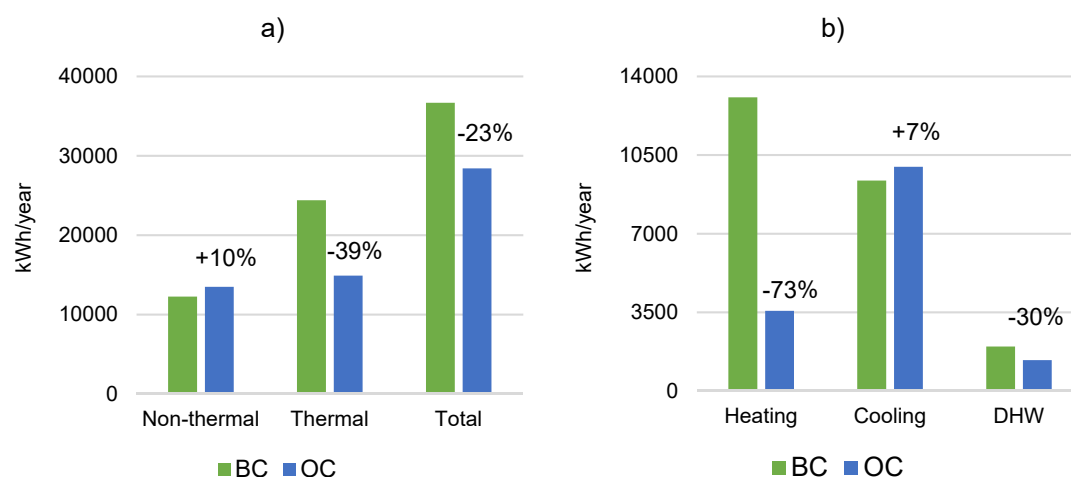


Fig. 59. Comparación entre el consumo de energía final anual del edificio en los escenarios BC y OC. A la izquierda (a) el consumo se agrupa según usos térmicos y no térmicos y se da también la suma total. A la derecha (b), se representa el desglose de consumo de los usos térmicos.

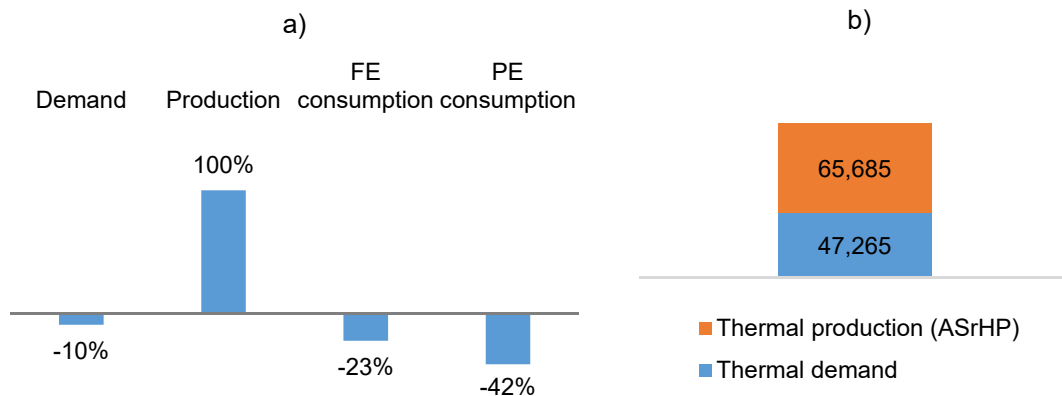


Fig. 60. A la izquierda (a), porcentaje de desviación de demanda, producción y consumo de energía final y primaria en el modelo OC con respecto al modelo BC. A la derecha (b), comparación entre la demanda anual de energía térmica del edificio en el estado OC y la energía producida por la ASrHP en kWh.

Según estos resultados, la mejora de la envolvente en la búsqueda del límite máximo de su capacidad, respetando la normativa de protección patrimonial y garantizando la calidad del aire interior de las viviendas, consigue una reducción en la demanda de anual de climatización del 10%. La disminución mayor, del 23%, se produjo en la demanda de calefacción. Por el contrario, la demanda de refrigeración se mantuvo casi idéntica, si bien se considera este resultado como favorable, ya que el periodo y el horario de refrigeración se ampliaron en el escenario OC con respecto al BC para asegurar el bienestar térmico en las viviendas.

El efecto conjunto de las medidas de mejora simuladas en el OC es beneficioso en términos de demanda, lo que es un resultado destacable que no debe darse por descontado. Algunas de las medidas implementadas en OC, como la reducción de infiltraciones y del valor U de algunos elementos de la envolvente, conducen directamente a una reducción de la carga térmica en las viviendas. Pero al combinar estas medidas con la introducción de sistemas de ventilación mecánica de flujo constante se puede llegar a modificar sustancialmente el comportamiento térmico, debido a que la entrada continua de aire añade una carga térmica adicional a los espacios. Los eficientes recuperadores de calor incluidos en los sistemas de ventilación explican este buen desempeño energético. Resultados similares fueron obtenidos por Figueredo *et al.* [185] en un edificio residencial en Aveiro, Portugal, al aplicar un MVS híbrido con recuperación de calor y modo bypass para el verano.

En cuanto a la producción de energía, el sistema ASrHP modelado en el escenario OC produce un 39% más de energía térmica que la necesaria para abastecer la demanda térmica global (Fig. 60b). Sin embargo, debido a la eficiencia de este sistema y a su buen rendimiento en cargas parciales, el consumo total de energía final se reduce en un 23%, como se muestra en la Fig. 60a. Los resultados del modelo OC muestran dos pequeños aumentos de este consumo: el primero debido al funcionamiento del ventilador del MVS (10%) (Fig. 59a); y el segundo debido al uso más extendido del sistema de refrigeración (7%) (Fig. 59b). Ambos se ven contrarrestados

por las importantes reducciones de consumo de energía final de la calefacción (-73%) y del sistema de producción de DHW (-30%).

En relación con el consumo de energía primaria, los factores de paso oficiales se aplicaron directamente al consumo de energía final en el modelo BC, distinguiendo entre las diferentes fuentes de energía que alimentan los sistemas térmicos en el modelo OC. La comparación se muestra en la Fig. 61.

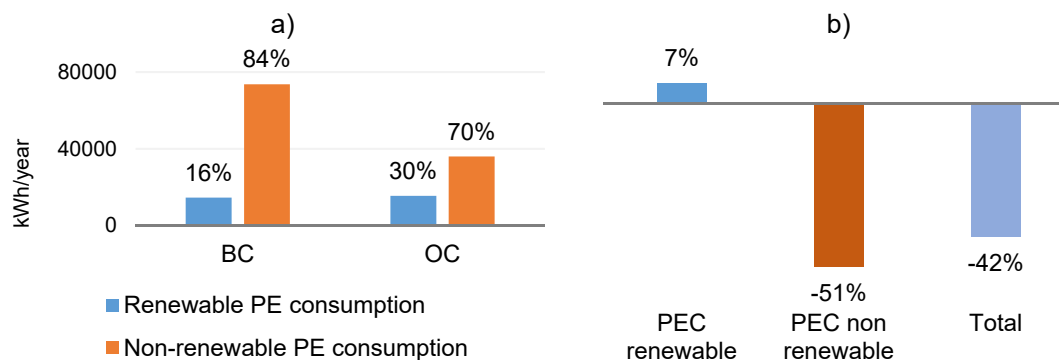


Fig. 61. Comparación de consumo de energía primaria en los escenarios BC y OC. A la izquierda (a), se representan los porcentajes de consumo de PE, renovable y no renovable, sobre el total. A la derecha (b), se indican los porcentajes de desviación de consumo de PE, renovable y no renovable, producidos en OC con respecto a los de BC.

De acuerdo con estos resultados, el ahorro de energía producido por la implementación del sistema híbrido es notable. La FE consumida por los sistemas térmicos se redujo un 39% (Fig. 59a) y la PE un 42% (Fig. 61b) con respecto a la solución tradicional, donde calefacción, refrigeración y calentamiento del agua se producen por separado con dispositivos de baja eficiencia. Como se muestra en la Fig. 62, en el estado OC, el consumo de PE del edificio es muy próximo al valor máximo reglamentario de un edificio rehabilitado no protegido en la zona climática B4. Las desviaciones con respecto al límite son del 23% para el consumo de PE total y del 26% para el consumo de PE no renovable.

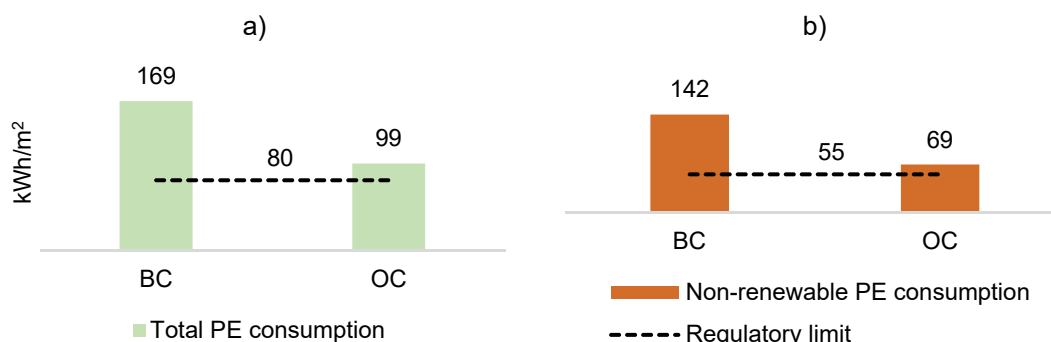


Fig. 62. Comparación del consumo unitario por superficie de energía primaria con los valores límites impuestos en el CTE DB HE0 para edificios no patrimoniales, en los estados BC y OC. A la izquierda (a), energía primaria total y a la derecha (b) porción no renovable.



### III. 4. Discusión general de resultados.

En esta tesis doctoral se ha profundizado en el conocimiento del comportamiento energético y las condiciones ambientales interiores de viviendas situadas en edificios catalogados de ciudades históricas de clima mediterráneo y se han propuesto soluciones que subsanen las deficiencias detectadas y que sean compatibles con las reglas de la protección patrimonial. La metodología empleada se basó en la generación de modelos de simulación energética dinámica de cuatro viviendas ocupadas del Conjunto Histórico de Sevilla. Para dar robustez a los resultados de simulación, en los modelos energéticos se integró información cualitativa sobre el comportamiento humano en relación al uso de la energía e información cuantitativa, obtenida mediante ensayos y monitorización de las principales variables ambientales. El estado actual de las viviendas fue diagnosticado y las conclusiones obtenidas sirvieron para diseñar una propuesta de rehabilitación integral que se aplicó posteriormente a uno de los edificios. La propuesta incluyó medidas pasivas y activas cuya aplicación no menoscaba los valores protegidos del edificio, ni los del paisaje urbano que le rodea, ni los de los restos arqueológicos de su subsuelo. Los resultados de simulación mostraron que la implementación de tales medidas aumentaba considerablemente la eficiencia energética y la calidad de las condiciones ambientales interiores de las viviendas, al tiempo que reducía significativamente su consumo de energía fósil. Como resultado, el comportamiento del edificio se aproximó notablemente al de uno de *consumo energético casi nulo* en la misma zona climática, de acuerdo a la normativa energética nacional.

Para alcanzar este resultado final, fue necesario, en primer lugar (**Sección 1**), comenzar analizando el área urbana de estudio seleccionada para la experimentación, el Conjunto Histórico de Sevilla. Ello permitió valorar el significativo impacto del conjunto de sus edificios catalogados en la descarbonización del área completa y derivó en una propuesta metodológica de tipo cuantitativo para realizar evaluaciones energéticas a escala urbana basadas en las manzanas. La metodología fue aplicada a una manzana previamente seleccionada, cuyo balance energético fue evaluado mediante herramientas de simulación dinámica bajo condiciones operacionales y de uso estándares. Se analizaron los resultados de simulación de un año completo referentes a demanda de energía de climatización, que es el uso final responsable de casi la mitad del consumo en la zona mediterránea y del bienestar térmico de los residentes, y se propusieron soluciones de mejora. Las principales conclusiones obtenidas en esta primera parte del trabajo de tesis fueron:

1. El 67% de los edificios del Conjunto Histórico de Sevilla están catalogados. Esta elevada proporción, sumada al hecho de que la mayoría son edificios de vivienda, obliga a reconsiderar con precaución su exclusión de las estrategias urbanas de rehabilitación energética.
2. El 95% de los edificios catalogados del Conjunto Histórico de Sevilla están protegidos bajo los dos niveles inferiores, C y D, y sólo un 5% bajo los niveles superiores, A y B.

Puesto que el grado de catalogación determina el alcance de las intervenciones permitidas en los edificios, podemos concluir que la gran mayoría de sus edificios catalogados admiten un margen relativamente amplio de mejora.

3. Los resultados de simulación indican que los edificios catalogados de viviendas del Conjunto Histórico de Sevilla no son especialmente *derrochadores* de energía de climatización. El tipo de intervenciones necesarias para reducir su demanda no son, en la gran mayoría de los casos, desproporcionadas, ajustándose con relativa facilidad a las limitaciones impuestas por las reglas de la protección patrimonial.
4. Sin embargo, los resultados del cálculo sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera producidas por estos edificios reflejan que éstas son muy elevadas. Reducirlas, manteniendo las fuentes de abastecimiento existentes basadas únicamente en combustibles de origen fósil, es una tarea más complicada y exige soluciones más sofisticadas que incluyan fuentes de energía renovable, cuya integración en los densos urbanos históricos mediterráneos puede producir conflicto con las reglas de protección paisajística y arqueológica.

Estas primeras conclusiones constituyeron una primera aproximación general a la resolución del problema abordado por esta tesis. Sin embargo, para el cumplimiento de sus objetivos fue necesario ampliar el alcance del análisis y perfeccionar la metodología. Para ello, en la segunda parte de la tesis (Sección 2) se seleccionaron cuatro viviendas habitadas del Conjunto Histórico de Sevilla y se estudiaron, además de los aspectos relacionados con la demanda y eficiencia energética, el confort térmico y la calidad de aire interior. Posteriormente, partiendo de los resultados de este segundo análisis, en la tercera parte (Sección 3), se abordó la cuestión de la mitigación del impacto medioambiental mediante la implantación de sistemas híbridos que integren energía renovable y no renovable, y que sean compatibles con las reglas de protección patrimonial.

Las viviendas analizadas pertenecen a edificios catalogados del barrio más poblado del Conjunto Histórico de Sevilla, el sector de planeamiento San Gil-Alameda. Fueron seleccionadas por ser representativas del conjunto urbano de estudio de acuerdo con tres criterios: la tipología arquitectónica, el nivel de catalogación y la diversidad de patrón de uso. El análisis energético de las viviendas, que estaban ocupadas y en condiciones operacionales, se hizo de manera detallada, a escala de habitación, aplicando un método de tipo mixto que integra el estudio de factores cuantitativos (monitorización y ensayos) y cualitativos (entrevistas y encuestas) relacionados con el uso de la energía en los edificios. Se evaluó el desempeño energético, el bienestar térmico y la calidad del aire interior de las dos habitaciones de cada vivienda. Los resultados sobre balance de cargas térmicas se clasificaron en dos grupos, según los factores implicados tuvieran relación con la envolvente de los edificios (cuya transformación está limitada) o con el comportamiento humano. Gracias a los datos recabados mediante monitorización, se identificaron los perfiles de uso de la climatización, que en los cuatro casos seguían un patrón intermitente. Debido a ello, para la evaluación del bienestar térmico se aplicaron modelos de confort adaptativo de diferentes textos normativos, lo que permitió profundizar en sus diferencias.

A continuación, se presenta la discusión general de los resultados correspondientes a la **Sección 2** de la tesis, agrupados por temas.

### Aplicación de los perfiles de uso estandarizados.

Los periodos de ocupación, así como la frecuencia y duración de los ciclos de calefacción y refrigeración declarados por los residentes fueron generalmente más largos que los registrados mediante monitorización. Esta divergencia es más acusada en verano que en invierno y también fue observada por Escandón *et al.* [186], [187] en edificios de vivienda social en la misma zona climática. Ello explica el bajo consumo energético real de las viviendas, inferior a la media nacional para edificios de pisos en clima mediterráneo. Sin embargo, es importante señalar que ninguna de las viviendas analizadas obedecía al perfil de pobreza energética y que el moderado uso de la climatización parece deberse a motivaciones personales y hábitos culturales. En vista de lo cual, de igual manera que en los edificios de vivienda no patrimonial, para evitar el fenómeno *Prebound* (situación que se da cuando los consumos energéticos reales son menores que los previstos y simulados en los modelos), que compromete la viabilidad económica de las rehabilitaciones energéticas, es necesario que las medidas de mejora contempladas en los planes de rehabilitación no se basen únicamente en los resultados de análisis realizados con perfiles de uso estandarizados.

### Confort térmico en condiciones de verano.

Según el modelo de confort adaptativo más restrictivo para las condiciones de verano (modelo MM), aplicado con nivel de expectativa bajo, sólo en un caso de tres se registraron condiciones de confort térmico aceptables. En esta vivienda, el sistema de refrigeración era eficiente (EER=3.25) y estuvo en funcionamiento durante el 58% de las horas ocupadas. En las otras dos viviendas los sistemas eran menos eficientes (EER=2.30 y 2.60) y los salones estuvieron fueron de confort durante el 34% y casi el 50% de las horas ocupadas, con un porcentaje de operación de la refrigeración del 66% y del 4%, respectivamente. Estos resultados indican que el bienestar térmico en verano es muy dependiente del funcionamiento regular y la eficiencia de los sistemas activos.

A excepción de uno de los casos (Caso 3), donde el salón y el dormitorio presentaron resultados de confort similares debido al reducido tamaño de la vivienda y la costumbre de mantener las puertas abiertas, los dormitorios fueron significativamente menos confortables que los salones durante el periodo analizado del verano de 2017. Las temperaturas medias diarias en los dormitorios fueron de 28 °C, 30 °C y 29 °C, produciendo un porcentaje de horas nocturnas fuera de confort de 21%, 100% y 38% en los Casos 1, 2 y 3, respectivamente. Esto fue parcialmente causado por la ausencia de sistemas de refrigeración en estas habitaciones, que hizo depender el bienestar térmico exclusivamente de la ventilación natural nocturna. Según los resultados obtenidos en esta investigación, esta estrategia pasiva por sí sola puede ser insuficiente para mantener una temperatura interior confortable para dormir. Ello obliga a no sobrestimar la capacidad real del refrescamiento nocturno *natural* en las ciudades de alta severidad climática

de verano, donde, con mucha frecuencia, las temperaturas exteriores nocturnas son muy elevadas (la mitad de las horas nocturnas del verano de 2017 superaron los 26 °C en Sevilla). La efectividad de esta estrategia pasiva depende de las cambiantes condiciones de viento y micro-clima urbano, pero, también, de la exposición de las envolventes de los edificios a ellas. La heterogénea morfología del parcelario urbano histórico, unido a las innumerables e indocumentadas obras que se han ido sucediendo a lo largo de la dilatada vida de estos edificios, que han aumentado la profundidad y la ocupación de los patios de manzana y han obstruido la mayoría de los conductos, son factores desfavorables al refrescamiento pasivo nocturno. También es importante considerar que, en ciudades muy calurosas, con frecuencia en verano, el salto térmico día-noche no alcanza la magnitud adecuada, haciendo inaprovechable el efecto pasivo favorable de la alta inercia térmica de los muros históricos. En algunos casos, como en el Caso 1, incluso puede resultar contraproducente si se coloca aislamiento térmico por su cara interior, provocando sobrecalentamiento del aire interior [37], [38], [39], [40].

Los resultados obtenidos sobre el confort térmico en condiciones de verano impiden asumir, de manera generalizada, la supuesta buena adaptación *natural* de las viviendas históricas de Andalucía al calor. La tendencia observada se verá agravada, además, en el escenario de cambio climático, que provocará en el sur de Europa periodos cálidos más largos y severos, con olas de calor más intensas y frecuentes y mayor número de días y noches muy calurosos. El estrés térmico interior en verano cobra por tanto especial protagonismo porque está relacionado con efectos adversos sobre la salud y con el aumento del riesgo de mortalidad [188], [189], [190], [191]. De acuerdo con los resultados aquí presentados, las viviendas patrimoniales no están mejor preparadas que el resto para afrontarlo.

### Confort térmico en condiciones de invierno.

A pesar del suave invierno sevillano de 2017, con temperaturas exteriores medias de 13 °C, sólo dos de las cuatro viviendas analizadas (Caso 1 y Caso 4) presentaron condiciones aceptables de bienestar térmico interior. Estas dos viviendas resultaron ser precisamente las que hacían un uso más continuado e intenso de los sistemas de calefacción (58% y 83% de las horas ocupadas), que, además, eran los más eficientes. Una de estas estas dos viviendas estaba habitada por una persona mayor y en la otra vivía una niña, lo que confirma la relevancia del factor edad en el uso de la energía, como apunta Guerra-Santín [126]. Pero incluso en ellas, la desviación media de las temperaturas interiores con respecto a las temperaturas operativas diarias de confort fue de 3 °C en las dos habitaciones analizadas. El bienestar térmico en invierno es muy dependiente del funcionamiento regular y de la eficiencia del sistema de calefacción. Por ello, en las viviendas donde no se encendía la calefacción o donde ésta era ineficiente y/o inadecuada (Casos 3 y 2, respectivamente), se produjo una situación de malestar térmico continuado, indicando que las prestaciones de sus envolventes no fueron suficientes para contrarrestar las condiciones exteriores. La falta de uso o el funcionamiento esporádico de la calefacción es común en las ciudades de clima mediterráneo. Este comportamiento está muy relacionado con la pobreza energética, pero también puede atribuirse a motivaciones personales



y preferencias culturales, como en el Caso 3. En el Caso 2 el malestar térmico en invierno es notable y en el Caso 3 alcanza el 100% de las horas ocupadas. Estas dos viviendas respaldan la tesis de la "paradoja de la mortalidad invernal" de Healy [192], según la cual las tasas de mortalidad más altas se encuentran generalmente en climas invernales menos severos y más suaves donde, en igualdad de condiciones, deberían registrarse tasas de mortalidad relacionada con el frío más bajas. El estudio se realizó en 14 países europeos y se encontró que Portugal y España registraban las tasas de mortalidad invernal más altas, mientras que Finlandia, Alemania y Holanda las más bajas. La baja calidad de las viviendas fue identificada como un factor potencialmente causante de esta paradoja. Los mismos resultados arrojaron estudios posteriores sobre el índice EWDI (*The Excess Winter Deaths Index*) que mide la proporción de muertes en el periodo invernal (de diciembre a marzo) en comparación con las muertes en el periodo no invernal. El de Fowler *et al.* [193], realizado en 31 países europeos, reveló que Malta, Portugal, España, Chipre y Bélgica tenían un EWDI significativamente más alto que la media de los otros 30 países europeos. No se encontró correlación clara entre el EWDI de cada país y la variabilidad interanual de la temperatura invernal. El estudio de Analitis *et al.* [194] estudió 15 ciudades europeas y concluyó que las temperaturas invernales están inversamente asociadas a la mortalidad y que, en las ciudades más cálidas del sur, el efecto de las frías temperaturas sobre la mortalidad es mayor que en las del norte. Según estos estudios, la baja calidad de la envolvente y de los sistemas mecánicos de climatización de los edificios de vivienda tiene, en invierno, mayor impacto que la severidad climática sobre las bajas temperaturas interiores, y, por tanto, sobre la salud de las personas. Por ello, a pesar de que las predicciones sobre el efecto del cambio climático en el sur de Europa indican que, en invierno, las bajas temperaturas extremas (olas de frío, días de heladas) serán menos frecuentes, reduciendo las cargas de calefacción en los hogares, la ausencia de bienestar térmico en las viviendas no debe ser ignorada, debido a su alto impacto sobre la salud.

En todos los casos, con independencia del perfil de comportamiento específico de los ocupantes, las pérdidas de calor en invierno fueron causadas en orden decreciente por: muros (entre el 23 y el 53% del total de pérdidas), cubiertas (entre el 20 y el 54%), infiltraciones de aire (entre el 15 y el 48%) y acristalamiento (entre el 6 y el 23%). La baja calidad higrotérmica de estos elementos sólo puede ser mejorada por el ocupante a través de la realización de obras. Dadas unas determinadas propiedades de la envolvente, el abanico de opciones que le quedan a las personas para contrarrestar las pérdidas de calor en invierno es muy reducido: (1) evitar la ventilación natural; (2) optimizar el uso de los sistemas de sombreado de las ventanas para que aquellas que estén favorablemente expuestas, y no el resto, reciban la mayor cantidad posible de radiación solar en horas de sol y baja nubosidad; y (3) encender el sistema de calefacción, si éste existe. La primera, cuya práctica está muy extendida en el sur de España [164], logra evitar pérdidas de calor, pero empeora la calidad del aire interior [195], [196], [197], [198]. La segunda requiere de mecanismos automatizados, infrecuentes en los edificios históricos de viviendas. La

efectividad de la tercera depende de la calidad técnica del sistema de calefacción y de su instalación.

### Aplicación de los modelos de confort adaptativos.

La aplicación de diferentes modelos de confort adaptativo produce resultados dispares. Esta disparidad es más acusada en verano que en invierno. Similares conclusiones fueron obtenidas por Escandón *et al.* para viviendas sociales en Sevilla [186], [187]. El de la norma europea UNE-EN 15251 (recientemente sustituida por la UNE-EN 16798-1, sin que el modelo de confort haya sido revisado) resultó especialmente inapropiado para los análisis de verano, porque llegó a admitir, para el año 2017, temperaturas de aire interior en las viviendas de 33 °C. Por ello, la aplicación de este modelo a las viviendas de Sevilla, o a las de otras poblaciones que sufren alta severidad climática en verano, merece ser puesto en cuestión. Esto es debido a que la UNE-EN 15251 no contempla el funcionamiento híbrido de los sistemas de refrigeración, común en las viviendas del sur de Europa, al que se adapta mucho mejor el modelo propuesto por Barbadilla *et al.* (modelo MM). Sin embargo, para las condiciones de invierno, el modelo adaptativo de la norma UNE-EN 15251 es muy restrictivo, revelando que su diseño obedece a patrones adaptativos más propios de países del norte que del sur de Europa. La disparidad observada entre los tres modelos de confort adaptativo exige una llamada de atención sobre la necesidad de investigar en mayor profundidad la cuestión del bienestar térmico de las viviendas en el contexto particular de las ciudades mediterráneas. En ellas, el funcionamiento híbrido de la refrigeración (que alterna medios naturales y mecánicos) es predominante en verano y, en invierno, la calefacción se usa de modo intermitente.

### Calidad de aire interior.

Mientras que, en verano, la calidad del aire interior se mantuvo en condiciones aceptables de manera general para todas las viviendas, en invierno, las tasas registradas de humedad relativa interior y la concentración de CO<sub>2</sub> en los dormitorios presentaron valores excesivamente altos.

En la vivienda del Caso 4, la sustitución de las antiguas carpinterías de madera por otras nuevas de gran hermeticidad, sin que tal medida fuera asociada a un plan integral de ventilación, produjo en invierno una excesiva concentración de CO<sub>2</sub> en el dormitorio, que superó los 1200 ppm durante más del 20% de las horas nocturnas. Este efecto contraproducente de aumentar la estanqueidad de la envolvente sin implementar ventilación mecánica o híbrida ha sido anteriormente señalado por otros investigadores en viviendas de la misma zona climática [164], [186], [162]. En ocasiones, también es responsable del aumento del riesgo de condensaciones y de proliferación de moho u otros bio-contaminantes [31].

Mientras que en verano las tasas de IRH permanecieron dentro del rango de calidad admisible (20-70%) por la normativa europea, en invierno fueron regularmente altas en las cuatro viviendas y fuera del rango admitido en la normativa nacional (40-50%). Este fenómeno se produce de manera más acusada en el Caso 3, casi permanentemente en libre evolución, pero también en

el resto, donde el uso de la calefacción es regular, lo que indica que puede deberse a la baja eficacia de los sistemas, unida a la baja calidad de sus envolventes.

En la mayor parte de las viviendas de la región mediterránea, la única posibilidad de renovación del aire interior es a través de la apertura de las ventanas (intencionado) y de las infiltraciones de aire a través de la envolvente (no intencionado). La costumbre de ventilar poco en invierno para evitar pérdidas de calor, unida, en algunos casos, al aumento de estanqueidad derivado de la sustitución de las viejas carpinterías, contribuyen a la acumulación de tasas excesivamente altas de CO<sub>2</sub> y humedad relativa interior de manera continuada. Este aspecto está relacionado con múltiples efectos nocivos sobre la salud y con la aparición de varias patologías constructivas y merece un estudio específico en profundidad que excede los objetivos de esta tesis.

En resumen, como señalan Monge-Barrio y Sánchez-Ostiz [199], las personas, a pesar de su capacidad de adaptación, no viven confortablemente fuera del rango de temperaturas entre 17.2 °C y 30.5 °C, que resulta muy estrecho en comparación con las temperaturas que se dan en los ambientes exteriores. Además, la tolerancia individual disminuye en situación de envejecimiento y enfermedad. Garantizar que se produzcan tales condiciones térmicas depende de un conjunto variado de factores relacionados con las propiedades de la envolvente de las viviendas, de los sistemas activos y del comportamiento humano, así como de la interacción entre ellos. De acuerdo con los resultados obtenidos en la segunda parte de esta tesis, el papel de las estrategias pasivas y del comportamiento humano en la mitigación de las condiciones exteriores y la optimización del balance energético es más relevante en verano que en invierno. Excepto para las viviendas situadas bajo cubierta, la optimización del balance energético en condiciones de verano depende significativamente de una correcta operación de las ventanas y de sus sistemas de sombreado, así como del uso adecuado de la ventilación natural nocturna, cuando las condiciones exteriores lo permiten. No obstante, los resultados también indican que, en verano, el bienestar térmico de las viviendas patrimoniales en zonas urbanas densas no debe depender exclusivamente de ellas y requiere, para la mayoría de los casos, del funcionamiento de sistemas de refrigeración eficientes, especialmente durante la noche. En invierno, para acercar estos edificios a los niveles calidad ambiental interior exigido a los edificios rehabilitados no patrimoniales, resulta indispensable la implementación de sistemas mecánicos eficientes de ventilación y calefacción.

A pesar del bajo consumo eléctrico registrado en las viviendas, siempre inferior a la media nacional, las emisiones de CO<sub>2</sub> duplicaron, e incluso triplicaron (en el Caso 2), las máximas permitidas a los edificios de reciente construcción o los rehabilitados no patrimoniales. Esto es debido a que la única fuente energética que abastece a las viviendas es la red eléctrica pública, lo que, además de llamar la atención sobre la necesidad de acelerar la descarbonización de la matriz energética nacional, obliga a abordar la cuestión de la integración de fuentes de energía renovable en los centros históricos.

Varios de los aspectos implicados en la rehabilitación energética de viviendas patrimoniales son comunes a las no patrimoniales: la inadecuación de los perfiles de operación y uso

estandarizados, la aplicación de modelos de confort adaptativo, la dependencia de los sistemas mecánicos de climatización y ventilación para garantizar buenas condiciones ambientales interiores, y el alto consumo de energía primaria para abastecer las necesidades energéticas. **Las mayores diferencias entre el comportamiento energético y ambiental de los edificios patrimoniales de vivienda y el de los no patrimoniales no residen, por tanto, en el diagnóstico, si no en la reparación de las deficiencias.** Para ambos conjuntos de edificios, la corrección de tales deficiencias afecta a la envolvente, a los sistemas activos y al comportamiento humano en relación a ambos. Mientras que los factores relacionados con el uso pueden ser corregidos en ambos conjuntos por igual, los relacionados con la envolvente y con los sistemas exigen mayor profundidad de análisis y soluciones específicas en el caso de los edificios patrimoniales, cuya intervención debe ser compatible con las reglas de conservación que les afectan. Pero, ¿cuál es realmente el peso de tales afecciones? ¿Pueden hacer inviable su transformación en *edificios de consumo energético casi nulo*? Si es así, ¿hasta qué nivel es posible llegar, con respecto a los umbrales exigidos en la normativa energética nacional, garantizando la protección de sus valores y los del paisaje urbano histórico en donde se encuentran?

Para dar respuesta a estas cuestiones, en la tercera y última parte de esta tesis (**Sección 3**), se abordó el diseño de una propuesta de rehabilitación energética y ambiental integral para uno de los edificios caso de estudio, a partir de las deficiencias diagnosticadas en una de sus viviendas (Caso 3). El edificio escogido está afectado por una triple protección patrimonial, hecho que tiene un impacto significativo sobre sus posibilidades de mejora: (1) la derivada de sus valores tipológicos históricos (catalogación C); (2) la derivada de su localización en el entorno de protección de un monumento catalogado como Bien de Interés Cultural; y (3) la derivada de su localización en un área de cautela arqueológica. Además de algunas medidas habituales de aplicación generalizada en la rehabilitación de los edificios de vivienda (cambio de carpinterías, vidrios, aislamiento de cubierta), se simuló el funcionamiento de un sistema de ventilación mecánica de flujo constante, con recuperador de calor, y un sistema híbrido de producción de energía térmica (calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria), en el que se integran fuentes de energía renovable con electricidad de la red pública. Todas las medidas fueron diseñadas para alcanzar los niveles de exigencia del CTE DB HE [14] y CTE DB HS [167] vigentes desde 2019 y aplicables a los edificios no patrimoniales. El sistema híbrido consistió en una bomba de calor reversible de alta eficiencia (aire-agua) que trabajaba en paralelo a un calentador eléctrico de agua convencional. Fue escogido por su compatibilidad con las normas de protección patrimonial, puesto que no incluye colectores solares (fotovoltaica o termo solar) ni geotermia. Los resultados de la tercera parte de la investigación mostraron que:

- Garantizando el bienestar térmico y la calidad de aire interior de las viviendas, el conjunto de medidas propuestas logró reducir la demanda energética del edificio un 10%, el consumo de electricidad en un 23%, el consumo de energía primaria total en un 42% y el de energía primaria no renovable en un 51%. El edificio se acercó notablemente al comportamiento de un edificio de *consumo energético casi nulo*. A pesar de la modesta

reducción de demanda alcanzada, la inclusión de energía renovable consiguió disminuir notablemente el consumo de energía primaria, total y no renovable, que se desviaron el 19% y 20%, respectivamente, del límite impuesto por la normativa nacional a los edificios rehabilitados no patrimoniales. Esta importante mejora con respecto al estado inicial, en el que el consumo de energía primaria duplicaba el máximo admisible para edificios rehabilitados no catalogados, se logró cumpliendo las normas de protección patrimonial, a pesar del incremento de uso de algunos sistemas activos (periodo de refrigeración más extendido, ventilación mecánica).

- La desviación calculada en consumo de energía primaria con respecto al máximo admisible del CTE DB HE0 [154] para los edificios no patrimoniales fue causado por dos factores: (1) el excesivo consumo de electricidad de los dispositivos auxiliares (bombas y ventiladores), que representó el 26% del consumo de energía final total); y (2) la todavía limitada proporción de renovables en la matriz energética nacional. Este segundo obstáculo afecta por igual a edificios patrimoniales y no patrimoniales. El primero podría corregirse implementando otros sistemas de apoyo renovable. Por ejemplo, un sistema de placas solares fotovoltaicas podría alimentar a los dispositivos auxiliares de la bomba de calor, entre otros usos finales de las viviendas; e intercambiadores de calor geotérmicos podrían lograr mayores ahorros, reduciendo la diferencia de temperatura del fluido entre la entrada y la salida. En muchos de los edificios catalogados del Conjunto Histórico de Sevilla, como en el analizado en esta investigación, tales sistemas de apoyo podrían provocar conflicto con las reglas de protección patrimonial.
- Las afecciones patrimoniales de tipo paisajístico y arqueológico de los edificios patrimoniales de vivienda pueden complicar su transformación completa en *edificios de consumo energético casi nulo*. Este tipo de afecciones podría tener, en muchos casos, mayor impacto que la protección de la materialidad física de la envolvente del edificio. La implantación de sistemas de apoyo basados en colectores solares y/o geotermia exige estudios detallados de evaluación de impacto sobre el entorno urbano y sobre el subsuelo, de acuerdo a la regulaciones paisajísticas y arqueológicas existentes.



## Capítulo IV. Conclusiones.

Esta tesis doctoral se redactó con el propósito de verificar si es posible aplicar un conjunto de medidas, tanto activas como pasivas, cuya implementación aumente la eficiencia energética, la disminución de emisiones de CO<sub>2</sub> y mejore las condiciones ambientales interiores de viviendas patrimoniales en clima mediterráneo, sin menoscabar los valores protegidos de los edificios ni las del paisaje urbano en que se insertan. Los resultados obtenidos permiten afirmar que tal tipo de rehabilitación energética es técnicamente viable y permiten avanzar en la generación del conocimiento necesario para afrontar las dificultades específicas que se presentan. Las principales conclusiones extraídas de la investigación son:

1. La rehabilitación energética de los edificios patrimoniales de vivienda es indispensable para descarbonizar los centros históricos de las ciudades mediterráneas, debido a su alta proporción dentro del conjunto. Garantizando la preservación de sus valores y los del paisaje histórico en que se insertan, la mayoría de ellos admite un amplio margen para la mejora. Su integración en los planes de urbanos de descarbonización es una herramienta eficaz para la conservación sostenible de los barrios históricos.
2. Contando con la proporción actual de energía baja en carbono en la matriz de generación eléctrica nacional (alrededor del 40%), es posible transformarlos en *edificios de consumo energético casi nulo* casi completamente los edificios patrimoniales residenciales de las ciudades históricas mediterráneas, sin menoscabo de sus valores y mejorando la calidad de las condiciones ambientales interiores. Para ello es necesario aplicar un conjunto de medidas que integren sistemas energéticos híbridos no basados en colectores solares.
3. Los análisis desarrollados durante la investigación muestran que el bienestar térmico y la calidad ambiental interior de las viviendas de los edificios patrimoniales de las ciudades mediterráneas son muy dependientes de los sistemas mecánicos de climatización y ventilación. También indican que, a pesar de su moderado consumo de energía, son edificios muy contaminantes porque se abastecen mayoritariamente de fuentes de energía de origen fósil. Ello obliga a poner en cuestión la asunción generalizada de que todos los edificios históricos de la región mediterránea presentan un rendimiento energético mejor que los construidos con posterioridad a 1945, debido a sus cualidades bioclimáticas, y que consiguen, por sí solos, mantener el confort térmico interior sin necesidad del apoyo de sistemas mecánicos de climatización. Su asumida adaptación natural a las condiciones exteriores ha sido con frecuencia sobreestimada y extrapolada a todos los casos, sin suficiente evidencia científica. Esto es especialmente relevante para el caso de las viviendas de los edificios patrimoniales, donde las personas, sobre todo las más vulnerables, pasan la mayor parte del tiempo.
4. La rehabilitación energética sostenible de las viviendas patrimoniales en clima mediterráneo es una tarea relacionada con factores diversos que van más allá de la conservación, que ha sido tradicionalmente el enfoque dominante y, muchas veces, casi el único. En este tipo de viviendas los criterios de intervención relacionados con salud y

medioambiente adquieren una relevancia singular porque, especialmente ante el escenario de cambio climático, garantizan la sostenibilidad social y económica de los centros históricos. La ponderación de los diferentes factores implicados es una tarea compleja y, si bien existen dificultades comunes a las viviendas de los edificios no patrimoniales, se dan también dificultades específicas, cuyo impacto ha podido ser estimado en esta investigación.

5. Los resultados de esta investigación indican que las dificultades específicas de este tipo de rehabilitación energética derivan, en primer lugar, de las regulaciones de protección que afectan a los edificios y al paisaje urbano donde se encuentran, y, en menor medida, de la heterogeneidad del conjunto y de su propia naturaleza física. Éstas pueden resumirse en tres: (1) reducir significativamente la demanda de energía de climatización resulta más difícil que en los edificios no patrimoniales, porque la mejora de las prestaciones térmicas de la envolvente está limitada; (2) integrar energía renovable puede resultar igualmente más difícil, debido a las restricciones derivadas de la protección paisajística y arqueológica y también a factores relacionados con la morfología de los densos centros urbanos históricos mediterráneos; y (3) los análisis a escala urbana son más complicados debido a la mayor heterogeneidad morfológica y constructiva de los edificios.
6. Las dificultades identificadas son superables, pero obligan a realizar análisis complejos multifocales, a emplear metodologías científicas rigurosas y a separarse de soluciones y métodos estándar. Acciones puntuales sobre la envolvente, en combinación con tecnologías altamente eficientes para la ventilación y el suministro de energía térmica mediante sistemas híbridos, presentan un enorme potencial para, a corto y medio plazo, acercar el rendimiento energético de las viviendas patrimoniales a las de reciente construcción o a las rehabilitadas no patrimoniales en la región mediterránea.
7. Debido a la limitación para intervenir en las envolventes, los sistemas térmicos híbridos de alta eficiencia, que integran fuentes de energía renovable y electricidad de la red pública, cobran un especial protagonismo en la rehabilitación energética de las viviendas patrimoniales mediterráneas. Se basan en tecnologías maduras de intercambio de calor que se adaptan más fácilmente que otras a las reglas de protección paisajística y a las restricciones de espacio propias de los centros históricos, consiguiendo considerables reducciones de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Esto permite compensar la modesta reducción de demanda de climatización, al tiempo que garantizar el bienestar térmico en el interior de las viviendas. Su capacidad descarbonizadora depende, en gran medida, del contenido de energía fósil en la matriz eléctrica nacional. Si ésta es muy baja en carbono, la necesidad de producir gran cantidad de energía renovable en la misma parcela se reduce drásticamente, simplificando la producción térmica en las densas áreas históricas de las ciudades mediterráneas.



## Epílogo

Las conclusiones obtenidas en esta tesis doctoral indican que los edificios patrimoniales de vivienda de las ciudades mediterráneas son energéticamente vulnerables y esta deficiencia irá en progresivo aumento con el cambio climático. Sin embargo, a pesar de las dificultades específicas que presentan, es posible rehabilitarlas de acuerdo con criterios energéticos y ambientales muy exigentes, acercando significativamente su comportamiento al de los *edificios de consumo energético casi nulo*, sin menoscabo de su integridad física ni de la autenticidad del paisaje urbano en que se encuentran. Por ello, es necesario que los edificios patrimoniales de vivienda se incluyan en los ambiciosos planes urbanos europeos de descarbonización, ya que su uso acorde a las exigencias contemporáneas de eficiencia, calidad de ambiente interior e impacto medioambiental representa la herramienta más eficaz y sostenible para su conservación.

A partir de estos resultados pueden plantearse futuras líneas de investigación que profundicen en los distintos aspectos implicados en su rehabilitación energética:

- i. La heterogeneidad morfológica y constructiva del conjunto de edificios patrimoniales de vivienda de los centros históricos mediterráneos demanda futuras evaluaciones a escala urbana que abarquen diferentes zonas climáticas y que sienten las bases de los planes de intervención. Las investigaciones deberían abordar muestras representativas de edificios, basadas en arquetipos, y deberían dar lugar a acciones piloto. Tales acciones deberían incluir el análisis en el estado anterior y posterior a la rehabilitación de los edificios, la monitorización del rendimiento de los sistemas activos instalados, vigilar la aparición de patologías y verificar la calidad de las condiciones ambientales anteriores.
- ii. Las subvenciones económicas para la rehabilitación de edificios de vivienda están condicionadas al cumplimiento de objetivos de eficiencia energética fijados en los planes nacionales y regionales. Estos objetivos son establecidos para edificios en general, en función de la zona climática en la que se encuentren, y, generalmente, no consideran la diferencia entre los que están oficialmente protegidos por sus valores patrimoniales y los que no. Ello complica su inclusión en los programas de rehabilitación porque genera incertidumbre en los responsables de gestionar los fondos. Partiendo de los métodos de análisis empleados en esta tesis y de sus resultados, se propone avanzar en la investigación que genere nuevos indicadores de eficiencia energética, y/o nuevos umbrales de cumplimiento de los existentes, específicos para los edificios patrimoniales de vivienda de las ciudades mediterráneas. Estos nuevos indicadores deberán estar basados en modelos de confort adaptativos apropiados a las particularidades del sur de Europa, permitiendo así su integración en planes de rehabilitación específicamente diseñados.
- iii. Por último, puesto que, como muestran los resultados de esta tesis, para la transformación completa de estos edificios en unos de *consumo energético casi nulo* resulta indispensable la implantación de sistemas térmicos eficientes alimentados por energía renovable en los centros históricos, debería abordarse científicamente la

cuestión del impacto visual y perceptivo de los colectores solares (fotovoltaica y termosolar) sobre su paisaje urbano. Se propone avanzar una nueva línea de investigación que, para los conjuntos históricos de las ciudades de Andalucía, desarrolle evaluaciones de visibilidad de la envolvente de sus edificios, con especial atención a los situados en entornos de protección. Estas evaluaciones permitirían calcular el potencial de aprovechamiento solar de sus azoteas y espacios libres, limitar áreas concretas con especial nivel de dificultad y establecer prioridades en la intervención.

## Referencias

- [1] C.J. Cleveland, *Encyclopedia of Energy*, Elsevier Science, 2004.
- [2] J. Rockström, O. Gaffney, J. Rogelj, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, H.J. Schellnhuber, A roadmap for rapid decarbonization, *Sci.* 355. (2017) 1269–1271. <https://doi.org/10.1126/science.aah3443>.
- [3] Parlamento Europeo, Directiva 2018/844/UE del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se modifica la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios y la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética, 2018.
- [4] Parlamento Europeo, Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la eficiencia energética de los edificios, 2010.
- [5] Eurostat, *Statistics Explained. Energy production and imports.*, 2020. (n.d.). [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy\\_production\\_and\\_imports/es&oldid=508592](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_production_and_imports/es&oldid=508592) (accessed August 31, 2021).
- [6] Consejo de las Comunidades Europeas, Directiva 93/76/CEE del Consejo relativa a la limitación de emisiones de dióxido de carbono mediante la mejora de la eficiencia energética (SAVE), 1993.
- [7] European Commission., 2050 long-term strategy | Climate Action, (n.d.). [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en) (accessed November 25, 2020).
- [8] P. Bertoldi, *Handbook of Energy Efficiency in Buildings. A life cycle approach. Chapter 2. Policies, recommendations and standards (International technical standards, main laws and regulations; EU directives; energy labeling)*, 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812817-6.00002-4>.
- [9] Parlamento Europeo, Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la eficiencia energética, por la que se modifican las Directivas 2009/125/CE y 2010/30/UE, y por la que se derogan las Directivas 2004/8/CE y 2006/32/CE, 2012.
- [10] Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España, ERESEE 2020. Update of the long-term Strategy for Energy Rehabilitation in the Building Sector in Spain., 2020.
- [11] Comisión Europea, Plan de recuperación para Europa, (n.d.). [https://ec.europa.eu/info/strategy/recovery-plan-europe\\_es](https://ec.europa.eu/info/strategy/recovery-plan-europe_es) (accessed September 1, 2021).
- [12] Ministerio de la Presidencia del Gobierno de España, Real Decreto 235/2013 de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios, 2013.
- [13] Jefatura del Estado de España, Ley 8/2013, de 26 de junio, de rehabilitación, regeneración y renovación urbanas, *Boletín Of. Estado.* (2013) 47964–48023.
- [14] Ministerio de Fomento del Gobierno de España, Código Técnico de la Edificación. Documento Básico. Ahorro de Energía, 2019.
- [15] R. Caro, Compromiso entre el futuro hipocarbónico y la protección del patrimonio urbano. El conjunto histórico de Sevilla. Trabajo Fin de Máster en Ciudad y Arquitectura Sostenible, Universidad de Sevilla, 2016.
- [16] R. Caro-Martínez, J.J. Sendra, Implementation of urban building energy modeling in historic districts. Seville as case-study, *Int. J. Sustain. Dev. Plan.* 13 (2018). <https://doi.org/10.2495/SDP-V13-N4-528-540>.

- [17] EFFESUS. Energy Efficiency for EU Historic Districts' Sustainability., 2012-2016. (n.d.). <https://www.fffesus.eu/>.
- [18] B. von Retteberg, I. Rodriguez-Maribona, Deliverable D1.1. European building and urban stock data collection. EU Project EFFESUS: Energy Efficiency for EU Historic Districts Sustainability., 2013.
- [19] F. Choay, *Alegoria del patrimonio*, Gustavo Gili, Barcelona, 2007.
- [20] UNESCO World Heritage Center, Vienna Memorandum on World Heritage and Contemporary Architecture. *Managing the Historic Urban Landscape*, (2005).
- [21] P. Bourdieu, *Distinction : a social critique of the judgement of taste*, Routledge & Kegan Paul, London :, 1986.
- [22] C. Kropp, Controversies around energy landscapes in third modernity, *Landsc. Res.* (2017) 1–12. <https://doi.org/10.1080/01426397.2017.1287890>.
- [23] P. Selman, Learning to Love the Landscapes of Carbon-Neutrality, *Landsc. Res.* 35 (2010) 157–171. <https://doi.org/10.1080/01426390903560414>.
- [24] V. Ferrario, M. Reho, Looking Beneath the Landscape of Carbon Neutrality, in: *Renew. Energies Eur. Landscapes*, Springer Netherlands, Dordrecht, 2015: pp. 95–113. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-9843-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9843-3_6).
- [25] Boletín Oficial de la Junta de Andalucía número 248, Ley 14/2007, de 26 de noviembre, del Patrimonio Histórico de Andalucía, 2007.
- [26] Junta de Andalucía, Anteproyecto de Ley por el que se modifica la Ley 14/2007, de 26 de noviembre, de Patrimonio Histórico de Andalucía. Normativa en elaboración, (n.d.). <https://www.juntadeandalucia.es/servicios/normativa/normas-elaboracion/detalle/138452.html>.
- [27] V. Pracchi, Historic Buildings and Energy Efficiency, *Hist. Environ. Policy Pract.* 5 (2014) 210–225. <https://doi.org/10.1179/1756750514Z.00000000052>.
- [28] K. Fouseki, M. Cassar, Energy Efficiency in Heritage Buildings — Future Challenges and Research Needs, *Hist. Environ. Policy Pract.* 5 (2014) 95–100. <https://doi.org/10.1179/1756750514Z.00000000058>.
- [29] M. Davies, T. Oreszczyn, The unintended consequences of decarbonising the built environment: A UK case study, *Energy Build.* 46 (2012) 80–85. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.043>.
- [30] H. Agbota, Anticipating the Unintended Consequences of the Decarbonisation of the Historic Built Environment in the UK, *Hist. Environ. Policy Pract.* 5 (2014) 101–115. <https://doi.org/10.1179/1756750514Z.00000000049>.
- [31] M. Ortiz, L. Itard, P.M. Bluyssen, Indoor environmental quality related risk factors with energy-efficient retrofitting of housing: A literature review, *Energy Build.* 221 (2020) 110102. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110102>.
- [32] L. Hao, D. Herrera-Avellanosa, C. Del Pero, A. Troi, What are the implications of climate change for retrofitted historic buildings? A literature review, *Sustain.* 12 (2020) 1–17. <https://doi.org/10.3390/su12187557>.
- [33] M. Sunikka-Blank, R. Galvin, Irrational homeowners? How aesthetics and heritage values influence thermal retrofit decisions in the United Kingdom, *Energy Res. Soc. Sci.* 11 (2016) 97–108. <https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2015.09.004>.
- [34] D.I. Kolaitis, E. Malliotakis, D.A. Kontogeorgos, I. Mandilaras, D.I. Katsourinis, M.A. Founti, Comparative assessment of internal and external thermal insulation systems for energy efficient retrofitting of residential buildings, *Energy Build.* 64 (2013) 123–131.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.04.004>.

- [35] P. Johansson, S. Geving, C.E. Hagentoft, B.P. Jelle, E. Rognvik, A.S. Kalagasidis, B. Time, Interior insulation retrofit of a historical brick wall using vacuum insulation panels: Hygrothermal numerical simulations and laboratory investigations, *Build. Environ.* 79 (2014) 31–45. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2014.04.014>.
- [36] C. Xu, S. Li, K. Zou, Study of heat and moisture transfer in internal and external wall insulation configurations, *J. Build. Eng.* 24 (2019) 100724. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.02.016>.
- [37] C. Di Perna, F. Stazi, A.U. Casalena, M. D’Orazio, Influence of the internal inertia of the building envelope on summertime comfort in buildings with high internal heat loads, *Energy Build.* 43 (2011) 200–206. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2010.09.007>.
- [38] F. Stazi, A. Vegliò, C. Di Perna, P. Munafò, Experimental comparison between 3 different traditional wall constructions and dynamic simulations to identify optimal thermal insulation strategies, *Energy Build.* 60 (2013) 429–441. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2013.01.032>.
- [39] S. Cirami, G. Evola, A. Gagliano, G. Margani, Thermal and Economic Analysis of Renovation Strategies for a Historic Building in Mediterranean Area, *Buildings.* 7 (2017). <https://doi.org/10.3390/buildings7030060>.
- [40] V. Tink, S. Porritt, D. Allinson, D. Loveday, Measuring and mitigating overheating risk in solid wall dwellings retrofitted with internal wall insulation, *Build. Environ.* 141 (2018) 247–261. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.062>.
- [41] J. Leissner, R. Kilian, L. Kotova, D. Jacob, U. Mikolajewicz, T. Broström, J. Ashley-Smith, H.L. Schellen, M. Martens, J. van Schijndel, F. Antretter, M. Winkler, C. Bertolin, D. Camuffo, G. Simeunovic, T. Vyhliđal, Climate for Culture: assessing the impact of climate change on the future indoor climate in historic buildings using simulations, *Herit. Sci.* 3 (2015) 38. <https://doi.org/10.1186/s40494-015-0067-9>.
- [42] G.B.A. Coelho, H. Entradas Silva, F.M.A. Henriques, Impact of climate change in cultural heritage: from energy consumption to artefacts’ conservation and building rehabilitation, *Energy Build.* 224 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110250>.
- [43] S. Sorrell, J. Dimitropoulos, The rebound effect: Microeconomic definitions, limitations and extensions, *Ecol. Econ.* 65 (2008) 636–649. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2007.08.013>.
- [44] G.G. Akkurt, N. Aste, J. Borderon, A. Buda, M. Calzolari, D. Chung, V. Costanzo, C. Del Pero, G. Evola, H.E. Huerto-Cardenas, F. Leonforte, A. Lo Faro, E. Lucchi, L. Marletta, F. Nocera, V. Pracchi, C. Turhan, Dynamic thermal and hygrometric simulation of historical buildings: Critical factors and possible solutions, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 118 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109509>.
- [45] UE, La Carta de Alaborg. Carta de las Ciudades Europeas hacia la Sostenibilidad, (1994) 1–8.
- [46] UE, Carta de Leipzig sobre ciudades europeas sostenibles, 2007.
- [47] Naciones Unidas, Acuerdo de Paris, 2015.
- [48] Naciones Unidas, Informe de la Conferencia de las Partes sobre su 25º período de sesiones, celebrado en Madrid del 2 al 15 de diciembre de 2019, 2019.
- [49] Naciones Unidas, Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, (n.d.). <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/> (accessed February 18, 2020).

- [50] UNESCO, Recomendación sobre el paisaje urbano histórico, 2011.
- [51] ICOMOS, The Valletta Principles for the Safeguarding and Management of Historic Cities, Towns and Urban Areas, 2011.
- [52] G. Carbonara, Energy efficiency as a protection tool, *Energy Build.* 95 (2015) 9–12. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.052>.
- [53] International Council on Monuments and Sites (ICOMOS), List of International Scientific Committees, (n.d.). <https://www.icomos.org/en/about-icomos/committees/scientific-committees/list-and-goals-of-isc> (accessed September 1, 2021).
- [54] AENOR AEN/CTN 41, UNE-EN 16883. Conservación del patrimonio cultural. Guía para la mejora de la eficiencia energética de los edificios históricos, 2018.
- [55] Intelligent Energy Europe Programme, New4Old. New energy for old buildings., (n.d.). <https://www.aee-intec.at/0uploads/dateien600.pdf>.
- [56] CARTIF Technology Centre, RENERPATH, (n.d.). <https://www.cartif.com/en/international-projects/european/interreg/item/989-renerpath.html>.
- [57] 3encult. Efficient Energy for EU Cultural Heritage., (n.d.). <https://hellomscaproject.eu/>.
- [58] EFFESUS, (n.d.). <https://cordis.europa.eu/project/id/314678/es>.
- [59] P. Eriksson, C. Hermann, S. Hrabovszky-Horváth, D. Rodwell, EFFESUS Methodology for Assessing the Impacts of Energy-Related Retrofit Measures on Heritage Significance, *Hist. Environ. Policy Pract.* 5 (2014) 132–149. <https://doi.org/10.1179/1756750514Z.00000000054>.
- [60] HeLLo. Heritage Energy Living Lab On site, (n.d.). <https://hellomscaproject.eu/>.
- [61] M. Andreotti, D. Bottino-Leone, M. Calzolari, P. Davoli, L.D. Pereira, E. Lucchi, A. Troi, Applied Research of the Hygrothermal Behaviour of an Internally Insulated Historic Wall without Vapour Dynamic Simulations, *Energies.* 13 (2020) 3362.
- [62] Interreg Europe, VIOLET. Preserve traditional buildings through energy reduction, (n.d.). <https://www.interregeurope.eu/violet/> (accessed June 19, 2019).
- [63] A. Martínez-Molina, I. Tort-Ausina, S. Cho, J.L. Vivancos, Energy efficiency and thermal comfort in historic buildings: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 61 (2016) 70–85. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.018>.
- [64] A.L. Webb, Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 77 (2017) 748–759. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.145>.
- [65] F. Berg, A.-C. Flyen, Å. Lund Godbolt, T. Broström, User-driven energy efficiency in historic buildings: A review, *J. Cult. Herit.* 28 (2017) 188–195. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.05.009>.
- [66] S. Lidelöw, T. Örn, A. Luciani, A. Rizzo, Energy-efficiency measures for heritage buildings: A literature review, *Sustain. Cities Soc.* 45 (2018) 231–242. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.029>.
- [67] L.F. Cabeza, A. De Gracia, A.L. Pisello, Integration of renewable technologies in historical and heritage buildings: A review, *Energy Build.* 177 (2018) 96–111. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.058>.
- [68] A. Galatioto, G. Ciulla, R. Ricciu, An overview of energy retrofit actions feasibility on Italian historical buildings, *Energy.* 137 (2017) 991–1000. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2016.12.103>.

- [69] A. Galatioto, R. Ricciu, T. Salem, E. Kinab, Energy and economic analysis on retrofit actions for Italian public historic buildings, *Energy*. 176 (2019) 58–66. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.167>.
- [70] L. De Santoli, Reprint of: “Guidelines on energy efficiency of cultural heritage,” *Energy Build*. 95 (2015) 2–8. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.050>.
- [71] F. Ascione, F. De Rossi, G.P. Vanoli, Energy retrofit of historical buildings: Theoretical and experimental investigations for the modelling of reliable performance scenarios, *Energy Build*. 43 (2011) 1925–1936. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.040>.
- [72] F. Ascione, N. Bianco, R.F. De Masi, F. de’ Rossi, G.P. Vanoli, Energy retrofit of an educational building in the ancient center of Benevento. Feasibility study of energy savings and respect of the historical value, *Energy Build*. 95 (2015) 172–183. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.072>.
- [73] N. Aste, R.S. Adhikari, M. Buzzetti, S. Della Torre, C. Del Pero, H.E. Huerto C, F. Leonforte, Microclimatic monitoring of the Duomo (Milan Cathedral): Risks-based analysis for the conservation of its cultural heritage, *Build. Environ*. 148 (2019) 240–257. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.11.015>.
- [74] K. Fabbri, M. Pretelli, Heritage buildings and historic microclimate without HVAC technology: Malatestiana Library in Cesena, Italy, UNESCO Memory of the World, *Energy Build*. 76 (2014) 15–31. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.051>.
- [75] R.A. Greta, C. Marta, S. Massimiliano, G. Laura, D. Pietromaria, Planning energy retrofit on historic building stocks: A score-driven decision support system, *Energy Build*. (2020) 110066. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110066>.
- [76] F. Ascione, F. Ceroni, R.F. De Masi, F. de’ Rossi, M.R. Pecce, Historical buildings: Multidisciplinary approach to structural/energy diagnosis and performance assessment, *Appl. Energy*. 185 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.089>.
- [77] E. Lucchi, Thermal transmittance of historical stone masonries: A comparison among standard, calculated and measured data, *Energy Build*. 151 (2017) 393–405. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.002>.
- [78] E. Lucchi, Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev*. 82 (2018) 3077–3090. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.031>.
- [79] F. Ascione, N. Cheche, R.F. De Masi, F. Minichiello, G.P. Vanoli, Design the refurbishment of historic buildings with the cost-optimal methodology: The case study of a XV century Italian building, *Energy Build*. 99 (2015) 162–176. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.027>.
- [80] Society for the Protection of Ancient Buildings (SPAB), (n.d.). <https://www.spab.org.uk/about-us> (accessed June 19, 2019).
- [81] Historic England, (n.d.). <https://historicengland.org.uk/advice/technical-advice/energy-efficiency-and-historic-buildings/> (accessed June 19, 2019).
- [82] Guidance Wheel | STBA, (n.d.). <https://responsible-retrofit.org/wheel/> (accessed September 2, 2021).
- [83] Accueil | Réhabilitation Bati Ancien – CREBA, (n.d.). <http://www.rehabilitation-bati-ancien.fr/fr> (accessed September 2, 2021).
- [84] R. Cantin, J. Burgholzer, G. Guarracino, B. Moujalled, S. Tamelikecht, B.G. Royet, Field assessment of thermal behaviour of historical dwellings in France, *Build. Environ*. (2010). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.07.010>.

- [85] DUMO. Sustainable preservation of monumental buildings., (n.d.). <https://www.nibe-sustainability-experts.com/en/dumo-sustainable-preservation-of-monuments> (accessed September 3, 2021).
- [86] P. Florio, *Towards a GIS-based Multiscale Visibility Assessment Method for Solar Urban Planning*, 2018.
- [87] P. Florio, *Facing Visual Pollution In Urban Areas*, *Sci. Trends.* (2018). <https://doi.org/10.31988/scitrends.37528>.
- [88] P. Florio, G. Peronato, A.T.D. Perera, A. Di Blasi, K.H. Poon, J.H. Kämpf, *Designing and assessing solar energy neighborhoods from visual impact*, *Sustain. Cities Soc.* 71 (2021) 102959. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2021.102959>.
- [89] D. Lingfors, T. Johansson, J. Widén, T. Broström, *Target-based visibility assessment on building envelopes: applications to PV and cultural-heritage values*, *Energy Build.* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.110533>.
- [90] C. Ornelas, J.M. Guedes, I. Breda-Vázquez, *Cultural built heritage and intervention criteria: A systematic analysis of building codes and legislation of Southern European countries*, *J. Cult. Herit.* (2016). <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.02.013>.
- [91] M.I.M. Torres, V. Peixoto de Freitas, *Treatment of rising damp in historical buildings: wall base ventilation*, *Build. Environ.* 42 (2007) 424–435. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2005.07.034>.
- [92] I. Torres, V.P. de Freitas, *The influence of the thickness of the walls and their properties on the treatment of rising damp in historic buildings*, *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 1331–1339. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.01.004>.
- [93] V.P. de Freitas, J. Delgado, *Hygrothermal behavior, Building Pathology and Durability.*, Springer, 2013.
- [94] H.E. Silva, F.M.A. Henriques, *Microclimatic analysis of historic buildings: A new methodology for temperate climates*, *Build. Environ.* 82 (2014) 381–387. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.005>.
- [95] G.B. Coelho, H. Entradas Silva, F.M. Henriques, *Calibrated hygrothermal simulation models for historical buildings*, *Build. Environ.* 142 (2018) 439–450. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.034>.
- [96] M. Posani, M.D.R. Veiga, V.P. de Freitas, *Towards Resilience and Sustainability for Historic Buildings: A Review of Envelope Retrofit Possibilities and a Discussion on Hygric Compatibility of Thermal Insulations*, *Int. J. Archit. Herit.* 15 (2021) 807–823. <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1650133>.
- [97] V. Gregório, J. Seixas, *Energy savings potential in urban rehabilitation: A spatial-based methodology applied to historic centres*, *Energy Build.* 152 (2017) 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.024>.
- [98] P. Nunes de Freitas, M.C. Guedes, *The use of windows as environmental control in “Baixa Pombalina’s” heritage buildings*, *Renew. Energy.* 73 (2015) 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.08.029>.
- [99] A. Perez-Garcia, A.P. Guardiola, F. Gómez-Martínez, A. Guardiola-Víllora, *Energy-saving potential of large housing stocks of listed buildings, case study: l’Eixample of Valencia*, *Sustain. Cities Soc.* 42 (2018) 59–81. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2018.06.018>.
- [100] M. Etxebarria Mallea, L. Etxepare Igiñiz, M. de Luxán García de Diego, *Passive hygrothermal behaviour and indoor comfort concerning the construction evolution of the traditional Basque architectural model. Lea valley case study*, *Build. Environ.* 143 (2018)



- 496–512. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2018.06.041>.
- [101] M.J. López-Zambrano, J. Canivell, C. Calama-González, Sistema de evaluación de soluciones de rehabilitación energética para edificios bien de interés cultural (SESREBIC). Su aplicación a monasterios BIC, *Inf. La Constr.* 71 (2019). <https://doi.org/10.3989/ic.63532>.
- [102] C.M. Muñoz-González, A.L. León-Rodríguez, J. Navarro-Casas, Air conditioning and passive environmental techniques in historic churches in Mediterranean climate. A proposed method to assess damage risk and thermal comfort pre-intervention, simulation-based, *Energy Build.* 130 (2016) 567–577. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.078>.
- [103] C.M. Muñoz González, A.L. León Rodríguez, R. Suárez Medina, J. Ruiz Jaramillo, Effects of future climate change on the preservation of artworks, thermal comfort and energy consumption in historic buildings, *Appl. Energy.* 276 (2020) 115483. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115483>.
- [104] T. Blázquez, S. Ferrari, R. Suárez, J.J. Sendra, Adaptive approach-based assessment of a heritage residential complex in southern Spain for improving comfort and energy efficiency through passive strategies: A study based on a monitored flat, *Energy.* 181 (2019) 504–520. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.160>.
- [105] R. Caro, J.J. Sendra, Evaluation of indoor environment and energy performance of dwellings in heritage buildings. The case of hot summers in historic cities in Mediterranean Europe, *Sustain. Cities Soc.* 52 (2020) 101798. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101798>.
- [106] R. Caro, J.J. Sendra, Are the dwellings of historic Mediterranean cities cold in winter? A field assessment on their indoor environment and energy performance, *Energy Build.* 230 (2021) 110567. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110567>.
- [107] R. Caro, J.J. Sendra, C.M. Muñoz González, The role of hybrid systems in the decarbonization of residential heritage buildings in mediterranean climate. A case study in Seville, Spain, *Energy Build.* 250 (2021) 111302. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.111302>.
- [108] Gerencia de Urbanismo del Ayuntamiento de Sevilla, Planeamiento de Desarrollo., (n.d.). <https://www.urbanismosevilla.org/planeamiento/planeamiento-desa>.
- [109] J. Gonçalves, R. Mateus, J.D. Silvestre, A.P. Roders, L. Bragança, Attitudes matter: Measuring the intention-behaviour gap in built heritage conservation, *Sustain. Cities Soc.* 70 (2021) 102913. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102913>.
- [110] International Energy Agency (EBC). Energy in Buildings and Communities Programme (EBC), Annex 79. Occupant Behaviour-Centric Building Design and Operation, (n.d.). <https://annex79.iea-ebc.org/> (accessed October 19, 2021).
- [111] International Energy Agency (IEA). Energy in Buildings and Communities Programme (EBC), Annex 66. Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings, (n.d.). <https://www.annex66.org/> (accessed January 21, 2020).
- [112] B. Faitão Balvedi, E. Ghisi, R. Lamberts, A review of occupant behaviour in residential buildings, *Energy Build.* 174 (2018) 495–505. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.049>.
- [113] T. Hong, D. Yan, S. D'Oca, C. fei Chen, Ten questions concerning occupant behavior in buildings: The big picture, *Build. Environ.* 114 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.006>.
- [114] Red Eléctrica de España (REE), (n.d.). <https://www.ree.es/es/datos/generacion/evolucion-renovable-no-renovable>.

- [115] IDAE, Proyecto SECH-SPAHOUSEC. Análisis del consumo energético del sector residencial en España. Informe final, 2011.
- [116] Ministerio de Hacienda y Función Pública, Sede Electrónica del Catastro, (n.d.). <https://www.sedecatastro.gob.es/>.
- [117] Junta de Andalucía, Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, (n.d.). <https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/> (accessed July 20, 2021).
- [118] Gobierno de España, AEMET (Agencia Estatal de Meteorología), (n.d.). <http://www.aemet.es/es/portada>.
- [119] IDAE, Manual de fundamentos técnicos de certificación energética de edificios existentes CE3X, 2015.
- [120] J.J. Sendra, Proyecto Eficacia : optimización energética en la vivienda colectiva, Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, Sevilla, 2011.
- [121] J.J. Sendra, S. Domínguez Amarillo, P. Bustamante Rojas, Á.L. León Rodríguez, Energy Intervention in the residential sector in the south of Spain: Current challenges, *Inf. La Construcción*. 65 (2013) 457–474.
- [122] J. Santamaría, S. Girón, M.A. Campano, Economic assessments of passive thermal rehabilitations of dwellings in Mediterranean climate, *Energy Build.* 128 (2016) 772–784. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.035>.
- [123] Gerencia de Urbanismo del Ayuntamiento de Sevilla, Infraestructura de datos espaciales de Sevilla (ide.SEVILLA), (n.d.). <https://sig.urbanismosevilla.org/InicioIDE.aspx>.
- [124] V. Fernández Salinas, Vivienda modesta y patrimonio cultural: los corrales y patios de vecindad en el Conjunto Histórico de Sevilla, *Scr. Nov.* VII (2003).
- [125] A. Villar Movellán, Arquitecto Espiau (1879-1938), Diputación Provincial de Sevilla, 1985.
- [126] O. Guerra-Santin, Relationship Between Building Technologies, Energy Performance and Occupancy in Domestic Buildings, in: D. Keyson, O. Guerra-Santin, D. Lockton (Eds.), *Living Labs*, Springer, Cham, 2017: p. 396. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-33527-8\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-319-33527-8_26).
- [127] U.S. Department of Energy, Energy Plus, (n.d.). <https://energyplus.net/>.
- [128] O. Guerra-Santin, N. Romero Herrera, E. Cuerda, D. Keyson, Mixed methods approach to determine occupants' behaviour – Analysis of two case studies, *Energy Build.* 130 (2016) 546–566. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.084>.
- [129] N. Romero Herrera, The Emergence of Living Lab Methods, in: *Living Labs*, Springer International Publishing, Cham, 2017: pp. 9–22. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-33527-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-33527-8_2).
- [130] B.F. Balvedi, E. Ghisi, R. Lamberts, A review of occupant behaviour in residential buildings, *Energy Build.* 174 (2018) 495–505. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.049>.
- [131] D. Yan, T. Hong, B. Dong, A. Mahdavi, S. D'Oca, I. Gaetani, X. Feng, IEA EBC Annex 66: Definition and simulation of occupant behavior in buildings, *Energy Build.* 156 (2017) 258–270. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.084>.
- [132] W. O'Brien, F. Tahmasebi, R.K. Andersen, E. Azar, V. Barthelmes, Z.D. Belafi, C. Berger, D. Chen, M. De Simone, Simona d'Oca, T. Hong, Q. Jin, D. Khovalyg, R. Lamberts, V. Novakovic, J.Y. Park, M. Plagmann, V.S. Rajus, M. Vellei, S. Verbruggen, A. Wagner, E. Willems, D. Yan, J. Zhou, An international review of occupant-related

- aspects of building energy codes and standards, *Build. Environ.* 179 (2020).  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106906>.
- [133] M. Sunikka-Blank, R. Galvin, Introducing the prebound effect: the gap between performance and actual energy consumption, *Build. Res. Inf.* 40 (2012) 260–273.  
<https://doi.org/10.1080/09613218.2012.690952>.
- [134] Gobierno de España, Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), (n.d.).  
<http://www.aemet.es/> (accessed October 1, 2019).
- [135] AEN/CTN 92, UNE-EN 13829. Aislamiento térmico. Determinación de la estanquidad al aire en edificios. Método de presurización por medio de ventilador, 2002.
- [136] M.C. Peel, B.L. Finlayson, T.A. McMahon, Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11 (2007) 1633–1644.  
<https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
- [137] C.M. Calama-González, R. Suárez, Á.L. León-Rodríguez, S. Domínguez-Amarillo, Evaluation of thermal comfort conditions in retrofitted facades using test cells and considering overheating scenarios in a mediterranean climate, *Energies.* 11 (2018).  
<https://doi.org/10.3390/en11040788>.
- [138] CTN100 Climatización, UNE-EN-16798-1. Eficiencia energética de los edificios. Ventilación en los edificios. Parte 1: Parámetros del ambiente interior a considerar para el diseño y la evaluación de la eficiencia energética de edificios incluyendo la calidad del aire interior, c, 2020.
- [139] H.-M. Fussler, A. Jol, A. Marx, M. Hildén, EEA Report: Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016, 2017. <https://doi.org/10.2800/534806>.
- [140] F. Pérez Gálvez, *Las obras de fábrica en la arquitectura doméstica sevillana de los siglos XVIII y XIX. Características constructivas y parámetros resistentes.*, University of Seville, 2004.
- [141] J. Fernández-Agüera, S. Domínguez-Amarillo, J.J. Sendra, R. Suárez, I. Oteiza, Social housing airtightness in Southern Europe, *Energy Build.* 183 (2018) 377–391.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.041>.
- [142] E. y T. Ministerio de Industria, Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios (RITE). Real Decreto 178/2021, 2021.
- [143] ASHRAE, Guideline 14-2014. Measurement of Energy Demand and Water Savings., 2014.
- [144] J. Robertson, B. Polly, J. Collis, Evaluation of Automated Model Calibration Techniques for Residential Building Energy Simulation. National Renewable Energy Laboratory (NREL) Technical Report 5500-60127, 2013.
- [145] Á.L. León, S. Domínguez, M.A. Campano, C. Ramírez-Balas, Reducing the Energy Demand of Multi-Dwelling Units in a Mediterranean Climate Using Solar Protection Elements, 5 (2012) 3398–3424. <https://doi.org/10.3390/en5093398>.
- [146] F. Nicol, Temperature and adaptive comfort in heated, cooled and free-running dwellings., *Build. Res. Inf.* (2017). <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1283922>.
- [147] S.A. Magalhães, V.P. De Freitas, A complementary approach for energy efficiency and comfort evaluation of renovated dwellings in Southern Europe, *Energy Procedia.* 132 (2017) 909–914. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.717>.
- [148] S. Carlucci, L. Bai, R. de Dear, L. Yang, Review of adaptive thermal comfort models in built environmental regulatory documents, *Build. Environ.* 137 (2018) 73–89.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.053>.

- [149] ASHRAE, Thermal environmental conditions for human occupancy. Standard 55-2017, 2017.
- [150] E. Barbadilla-Martín, J.M. Salmerón Lissén, J. Guadix Martín, P. Aparicio-Ruiz, L. Brotas, Field study on adaptive thermal comfort in mixed mode office buildings in southwestern area of Spain, *Build. Environ.* 123 (2017) 163–175. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.042>.
- [151] V. Tink, S. Porritt, D. Allinson, D. Loveday, Measuring and mitigating overheating risk in solid wall dwellings retrofitted with internal wall insulation, *Build. Environ.* 141 (2018) 247–261. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2018.05.062>.
- [152] Finnish Society for Indoor Air Quality and Climate FiSIAQ, Finnish Classification of Indoor Environment. Target values, design guidance and product requirements., 2008.
- [153] AEN CTN 100, UNE EN 15251: 2008. Parámetros del ambiente interior a considerar para el diseño y la evaluación de la eficiencia energética de edificios, incluyendo la calidad del aire interior, condiciones térmicas, iluminación y ruido., 2008.
- [154] Ministerio de Fomento del Gobierno de España, Código Técnico de la Edificación. Documento Básico Ahorro de Energía HE0. Limitación del consumo energético, 2019.
- [155] J. de Andalucía, Catálogo General del Patrimonio Histórico Andaluz, (n.d.). <https://www.juntadeandalucia.es/organismos/culturaypatrimoniohistorico/areas/bienes-culturales/catalogo-pha.html>.
- [156] P.M. Congedo, C. Baglivo, S. Bonuso, D. D'Agostino, Numerical and experimental analysis of the energy performance of an air-source heat pump (ASHP) coupled with a horizontal earth-to-air heat exchanger (EAHX) in different climates, *Geothermics*. 87 (2020) 101845. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101845>.
- [157] C. Baglivo, P.M. Congedo, D. Laforgia, Air cooled heat pump coupled with Horizontal Air-Ground Heat Exchanger (HAGHE) for Zero Energy Buildings in the Mediterranean climate, *Energy Procedia*. 140 (2017) 2–12. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.118>.
- [158] I. Theodoridou, M. Karteris, G. Mallinis, A.M. Papadopoulos, M. Hegger, Assessment of retrofitting measures and solar systems' potential in urban areas using Geographical Information Systems: Application to a Mediterranean city, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (2012) 6239–6261. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.075>.
- [159] Ministerio de Fomento del Gobierno de España., Código Técnico de la Edificación. Documento Básico HE1. Condiciones para el control de la demanda energética., 2019.
- [160] E. y T. del G. de E. Ministerio de Industria, Factores de emisión de CO<sub>2</sub> y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector de edificios en España., 2016.
- [161] AEN/CTN 81 Prevención y Medios de Protección Personal y Colectiva en el Trabajo., UNE EN ISO 7730: 2005. Ergonomía del ambiente térmico, 2006.
- [162] J. Fernández-Agüera, S. Domínguez, C. Alonso, F. Martín-Consuegra, Thermal comfort and indoor air quality in low-income housing in Spain: the influence of airtightness and occupant behaviour., *Energy Build.* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.052>.
- [163] L.J. Underhill, C.W. Milando, J.I. Levy, W.S. Dols, K. Sharon, M.P. Fabian, Simulation of indoor and outdoor air quality and health impacts following installation of energy-efficient retrofits in a multifamily housing unit, *Build. Environ.* (2019) 106507. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106507>.
- [164] S. Domínguez-Amarillo, J. Fernández-Agüera, J. Sendra, S. Roaf, S. Domínguez-Amarillo, J. Fernández-Agüera, J.J. Sendra, S. Roaf, Rethinking User Behaviour

- Comfort Patterns in the South of Spain—What Users Really Do, *Sustainability*. 10 (2018) 4448. <https://doi.org/10.3390/su10124448>.
- [165] D. Bienvenido-Huertas, C. Rubio-Bellido, D. Sánchez-García, J. Moyano, Internal surface condensation risk in façades of Spanish social dwellings, *Build. Res. Inf.* 47 (2019) 928–947. <https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1612729>.
- [166] S. Ginestet, C. Aschan-Leygonie, T. Bayeux, M. Keirsbulck, Mould in indoor environments: the role of heating, ventilation and fuel poverty. A French perspective, *Build. Environ.* (2019) 106577. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106577>.
- [167] Ministerio de Fomento del Gobierno de España, Código Técnico de la Edificación. Documento Básico HS Salubridad, 2019.
- [168] International Energy Agency (IEA), *Renewable Power*, (n.d.). <https://www.iea.org/reports/renewable-power> (accessed March 1, 2021).
- [169] S. Nižetić, A.M. Papadopoulos, G.M. Tina, M. Rosa-Clot, Hybrid energy scenarios for residential applications based on the heat pump split air-conditioning units for operation in the Mediterranean climate conditions, *Energy Build.* 140 (2017) 110–120. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.064>.
- [170] R. Stasi, S. Liuzzi, S. Paterno, F. Ruggiero, P. Stefanizzi, A. Stragapede, Combining bioclimatic strategies with efficient HVAC plants to reach nearly-zero energy building goals in Mediterranean climate, *Sustain. Cities Soc.* 63 (2020) 102479. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102479>.
- [171] A.S. Gaur, D.Z. Fitiwi, J. Curtis, Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review, *Energy Res. Soc. Sci.* 71 (2021) 101764. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101764>.
- [172] F. Neirotti, M. Noussan, M. Simonetti, Towards the electrification of buildings heating - Real heat pumps electricity mixes based on high resolution operational profiles, *Energy*. 195 (2020) 116974. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116974>.
- [173] M. Jarre, M. Noussan, M. Simonetti, Primary energy consumption of heat pumps in high renewable share electricity mixes, *Energy Convers. Manag.* 171 (2018) 1339–1351. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.067>.
- [174] G. Bagarella, R. Lazzarin, M. Noro, Annual simulation, energy and economic analysis of hybrid heat pump systems for residential buildings, *Appl. Therm. Eng.* 99 (2016) 485–494. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.089>.
- [175] M. Jarre, M. Noussan, A. Poggio, M. Simonetti, Opportunities for heat pumps adoption in existing buildings: Real-data analysis and numerical simulation, in: *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2017: pp. 499–507. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.608>.
- [176] I. Sarbu, C. Sebarchievici, Chapter 4. Types of Compressors and Heat Pumps, in: I. Sarbu, C. Sebarchievici (Eds.), *Ground-Source Heat Pumps. Fundam. Exp. Appl.*, Elsevier, 2016: pp. 47–70. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804220-5.00004-7>.
- [177] K. Rice, B. Shen, J. Munk, M. Ally, V. Baxter, D.S. Engineers, Development of a Variable-Speed Residential Air-Source Integrated Heat Pump, in: *11th IEA Heat Pump Conf. 2014, May 12-16 2014, Montréal Canada.*, 2014: pp. 1–12.
- [178] C. Naldi, E. Zanchini, Dynamic simulation during summer of a reversible multi-function heat pump with condensation-heat recovery, *Appl. Therm. Eng.* 116 (2017) 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.01.066>.
- [179] G. Lo Basso, F. Rosa, D. Astiaso Garcia, F. Cumo, Hybrid systems adoption for lowering historic buildings PFEC (primary fossil energy consumption) - A comparative energy analysis, *Renew. Energy*. 117 (2018) 414–433.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.099>.

- [180] B. Torregrosa-Jaime, B. González, P.J. Martínez, G. Payá-Ballester, Analysis of the operation of an aerothermal heat pump in a residential building using building information modelling, *Energies*. 11 (2018). <https://doi.org/10.3390/en11071642>.
- [181] Diario Oficial de la Unión Europea, Decisión de la Comisión por la que se establecen las directrices para el cálculo por los Estados miembros de la energía renovable procedente de las bombas de calor de diferentes tecnologías, conforme a lo dispuesto en el artículo 5 de la Directiva 2009/28, 2013.
- [182] CEN/TC 113, EN 14825:2018. Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling. Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance., 2018.
- [183] B. Shen, J. New, V. Baxter, Air source integrated heat pump simulation model for EnergyPlus, *Energy Build.* 156 (2017) 197–206. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.064>.
- [184] V. Bianco, F. Scarpa, L.A. Tagliafico, Estimation of primary energy savings by using heat pumps for heating purposes in the residential sector, *Appl. Therm. Eng.* 114 (2017) 938–947. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.058>.
- [185] A. Figueiredo, J. Figueira, R. Vicente, R. Maio, Thermal comfort and energy performance: Sensitivity analysis to apply the Passive House concept to the Portuguese climate., *Build. Environ.* 103 (2016) 276–288. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.031>.
- [186] R. Escandón, R. Suárez, J.J. Sendra, On the assessment of the energy performance and environmental behaviour of social housing stock for the adjustment between simulated and measured data: The case of mild winters in the Mediterranean climate of southern Europe, *Energy Build.* 152 (2017) 418–433. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.063>.
- [187] R. Escandón, R. Suárez, J.J. Sendra, Field assessment of thermal comfort conditions and energy performance of social housing: The case of hot summers in the Mediterranean climate, *Energy Policy*. 128 (2019) 377–392. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.01.009>.
- [188] J. Díaz, A. Jordán, R. García, C. López, J. Alberdi, E. Hernández, A. Otero, Heat waves in Madrid 1986–1997: effects on the health of the elderly, *Int. Arch. Occup. Environ. Health*. 75 (2002) 163–170. <https://doi.org/10.1007/s00420-001-0290-4>.
- [189] R.S. Kovats, S. Hajat, Heat Stress and Public Health: A Critical Review, *Rev. Adv. Annu. Rev. Public Heal.* 29 (2008) 41–55. <https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843>.
- [190] J. Paravantis, M. Santamouris, C. Cartalis, C. Efthymiou, N. Kontoulis, Mortality Associated with High Ambient Temperatures, Heatwaves, and the Urban Heat Island in Athens, Greece, *Sustainability*. 9 (2017) 606. <https://doi.org/10.3390/su9040606>.
- [191] A. Pyrgou, M. Santamouris, Increasing Probability of Heat-Related Mortality in a Mediterranean City Due to Urban Warming, *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 15 (2018) 1571. <https://doi.org/10.3390/ijerph15081571>.
- [192] J.D. Healy, Excess winter mortality in Europe: a cross country analysis identifying key risk factors., *Epidemiol Community Heal.* (2003) 784–789.
- [193] T. Fowler, R.J. Southgate, T. Waite, R. Harrell, S. Kovats, A. Bone, Y. Doyle, V. Murray, Excess winter deaths in Europe: A multi-country descriptive analysis., *Eur. J. Public Health*. 25 (2015) 339–345. <https://doi.org/10.1093/eurpub/cku073>.

- [194] A. Analitis, K. Katsouyanni, A. Biggeri, M. Baccini, B. Forsberg, L. Bisanti, U. Kirchmayer, F. Ballester, E. Cadum, P.G. Goodman, A. Hojs, J. Sunyer, P. Tiittanen, P. Michelozzi, Effects of cold weather on mortality: Results from 15 European cities within the PHEWE project., *Am. J. Epidemiol.* 168 (2008) 1397–1408. <https://doi.org/10.1093/aje/kwn266>.
- [195] C.D. Maidment, C.R. Jones, T.L. Webb, E.A. Hathway, J.M. Gilbertson, The impact of household energy efficiency measures on health: A meta-analysis, *Energy Policy*. 65 (2014) 583–593. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.054>.
- [196] N. Willand, I. Ridley, C. Maller, Towards explaining the health impacts of residential energy efficiency interventions - A realist review. Part 1: Pathways, *Soc. Sci. Med.* 133 (2015) 191–201. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2015.02.005>.
- [197] J. Ortiz, N. Casquero-Modrego, J. Salom, Health and related economic effects of residential energy retrofitting in Spain, *Energy Policy*. 130 (2019) 375–388. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.04.013>.
- [198] L.J. Underhill, C.W. Milando, J.I. Levy, W.S. Dols, S.K. Lee, M.P. Fabian, Simulation of indoor and outdoor air quality and health impacts following installation of energy-efficient retrofits in a multifamily housing unit, *Build. Environ.* 170 (2020) 106507. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106507>.
- [199] A. Monge-Barrio, A. Sánchez-Ostiz Gutiérrez, Chapter 3. Vulnerable and Non-vulnerable Occupants in Residential Buildings. *Passive Energy Strategies for Mediterranean Residential Buildings.*, in: 2018: pp. 21–44. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-69883-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-69883-0_3).





## Lista de figuras.

### Bloque A. Capítulo III.1. Sección 1.

Fig. 1. Término municipal de Sevilla donde se destaca el territorio abarcado por el Plan Especial de Protección del Conjunto Histórico y el ámbito de estudio.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 2. Cartografía del catálogo de protección del Plan Especial de Protección del Conjunto Histórico de Sevilla con indicación de los niveles de catalogación de cada edificio.

Fuente: elaboración propia a partir del mapa de catalogación en formato *shape* cedido por Gerencia de Urbanismo del Ayuntamiento de Sevilla para los fines de esta investigación.

Fig. 3. Distribución espacial del parámetro HAD en las manzanas del ámbito de estudio con la delimitación de los cuatro barrios localizados al norte.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 4. Distribución de frecuencia de HAD en el ámbito de estudio (539 manzanas, color gris) y en el sector norte que incluye los barrios San Lorenzo, San Gil, Feria y San Julián (167 manzanas, color naranja).

Fuente: elaboración propia.

Fig. 5. Orto fotografía de la manzana seleccionada.

Fuente: Cartografía de Sevilla disponible en ide.SEVILLA (<https://sig.urbanismosevilla.org/>).

Fig. 6. A la izquierda, vista de la manzana modelo desde la Calle Señor de la Sentencia, y a la derecha, desde la Calle Relator.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 7. Consumo de energía primaria no renovable de cada uno de los cinco edificios en su estado original y tras la aplicación de las medidas de mejora, comparado con el límite establecido en el Código Técnico vigente.

Fuente: elaboración propia.

## Bloque A. Capítulo III.2. Sección 2

Fig. 8. Mapa del área de estudio (color amarillo) sobre la trama urbana de Sevilla. Se señalan el sector de planeamiento San Gil-Alameda (color rojo) y el conjunto urbano incluido en la Lista Mundial de Patrimonio de la UNESCO (color gris oscuro).

Fuente: elaboración propia.

Fig. 9. Distribución espacial de los edificios catalogados en el sector San Gil-Alameda según su grado de protección. Los edificios caso de estudio se señalan numerados en color negro.

Fuente: elaboración propia a partir del mapa de catalogación en formato *shape* cedido por Gerencia de Urbanismo del Ayuntamiento de Sevilla para los fines de esta investigación.

Fig. 10. Distribución espacial de los edificios catalogados C en el sector San Gil-Alameda según su tipología. Los edificios caso de estudio se señalan numerados en color negro.

Fuente: elaboración propia a partir del mapa de catalogación en formato *shape* cedido por Gerencia de Urbanismo del Ayuntamiento de Sevilla para los fines de esta investigación.

Fig. 11. Frecuencia de grados de catalogación (a) y tipologías (b) en el sector de planeamiento de San Gil-Alameda, en número de edificios. No: edificios no catalogados, SE: Casa señorial, PO: Casa popular, CV: Corral de vecinos, PA: Casa patio, PI: Casa de pisos, VS: Vivienda singular.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 12. Vistas exteriores de los edificios analizados. A la izquierda, imagen del Caso 1 y a la derecha, del Caso 2.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 13. Vistas exteriores del Caso 3 (a, fachada principal y b, patio interior) y del Caso 4 (c).

Fuente: elaboración propia.

Fig. 14. Planta de la vivienda del Caso 1. La posición de los dos sensores utilizados en la monitorización aparece indicada en color rojo.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 15. Plantas y sección de la vivienda del Caso 2. La posición de los dos sensores utilizados en la monitorización aparece indicada en color rojo.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 16. Planta de la vivienda del Caso 3. La posición de los dos sensores utilizados en la monitorización aparece indicada en color rojo.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 17. Plantas del edificio Caso 3. La vivienda monitorizada (número 12) está situada en la segunda planta. En color ocre se han sombreado las superficies de uso comunitario: P: patio, G: galería, T: terraza, FT: terraza sobre cubierta plana.

Fuente: elaboración propia a partir de datos cartográficos del catastro (<https://www.sedecatastro.gob.es/>).

Fig. 18. Plantas de la vivienda del Caso 4. La posición de los dos sensores utilizados en la monitorización aparece indicada en color rojo.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 19. Gráficos de dispersión que muestran la evolución mensual de los valores de OAT en Sevilla. Los puntos azules corresponden a las temperaturas de aire exterior registradas en 2017 y los puntos naranjas a los datos históricos. Los valores medios se representan en (a), los máximos en (b) y los mínimos en (c).

Fuente: elaboración propia.

Fig. 20. Distribución de valores horarios de temperatura exterior del aire (OAT) durante las noches del periodo comprendido entre el 15 de junio y el 15 de septiembre de 2017. Las temperaturas inferiores a 26 °C se representan en azul. Por encima de este límite, se representan en colores cálidos.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 21. Condiciones de verano. Evolución horaria de concentración de CO<sub>2</sub> y IRH durante el periodo representativo en los Casos 1(a), Caso 2 (b) y Caso 3 (c). La línea negra de rayas señala el límite superior de calidad de aire. Los ciclos de ventilación natural se señalan en flechas azules.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 22. Evolución horaria de temperaturas interiores en el periodo representativo de invierno en Caso 1 (a), Caso 2 (b), Caso 3 (c) y Caso 4 (d). Los ciclos de calefacción están marcados en colores suaves y su duración indicada en número de horas. Los ciclos de ventilación natural (NVC) se señalan en flechas de color negro.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 23. Perfil de uso en el día representativo de invierno de Caso 1 (a), Caso 2 (b), Caso 3 (c) y Caso 4 (d). Los ciclos de ocupación se marcan en tono rojo suave (salones) y azul suave (dormitorios). Se señala la evolución horaria de OAT y la concentración de CO<sub>2</sub> e IRH en el interior de las habitaciones. Los niveles recomendados de concentración de CO<sub>2</sub> se indican en líneas negras rayadas. Se señalan los ciclos de ventilación natural (NVC).

Fuente: elaboración propia.

Fig. 24. Divergencia entre la información cualitativa obtenida mediante encuestas (trama de rayas color gris) y la cuantitativa deducida a partir de los datos de monitorización (colores sólidos), en horas, durante el periodo representativo de 11 días de invierno. La ocupación se representa a la izquierda (a) y el uso de la calefacción a la izquierda (b).

Fuente: elaboración propia.

Fig. 25. Calibración gráfica de los modelos de simulación del Caso 1 (a), Caso 2 (b) y Caso 3 (c) en condiciones de verano.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 26. Calibración gráfica de los modelos de simulación del Caso 1 (a), Caso 2 (b), Caso 3 (c) y Caso 4 (d) en condiciones de invierno.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 27. Balance de cargas térmicas en condiciones de verano. A la izquierda (a) las cargas relacionadas con el comportamiento de los residentes y a la derecha (b) las relacionadas con el estado físico de la envolvente.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 28. Balance de cargas térmicas en condiciones de invierno. A la izquierda (a) las cargas relacionadas con el comportamiento de los residentes y a la derecha (b) las relacionadas con el estado físico de la envolvente.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 29. Condiciones de verano. Porcentaje de ganancias térmicas producidas por cada elemento de la envolvente sobre el total para el periodo representativo analizado, considerando el valor medio de los espacios analizados (Lr y Br).

Fuente: elaboración propia.

Fig. 30. Condiciones de invierno. Porcentaje de pérdidas térmicas producidas por cada elemento de la envolvente sobre el total para el periodo representativo analizado, considerando el valor medio de los espacios analizados (Lr y Br).

Fuente: elaboración propia.

Fig. 31. Carga térmica conjunta en verano e invierno producida por los elementos de la envolvente (muros, cubiertas, infiltraciones y acristalamiento) en los casos de estudio. No se cuenta con datos de verano para el Caso 4.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 32. Evolución de los límites admisibles superiores e inferiores de Top en el mes de julio (a) y de diciembre (b) de 2017, de acuerdo a los tres modelos de confort adaptativo aplicados.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 33. Condiciones de verano. Evaluación de confort térmico en los salones (Lr) y dormitorios (Br) de las viviendas caso de estudio: Caso 1 (a), Caso 2 (b) y Caso 3 (c). Se presenta la comparación entre los tres modelos de confort adaptativo empleados en el análisis.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 34. Condiciones de verano. Porcentaje de horas fuera de la banda de confort en el salón (Lr) y dormitorio (Br) de los casos de estudio: Caso 1 (a), Caso 2 (b) y Caso 3 (c). Se presenta la comparación entre los tres modelos de confort y los dos perfiles de uso considerados durante el periodo representativo de 11 días.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 35. Condiciones de verano. Desviación media de las IAT horarias en relación a los valores horarios de Top, en salón (Lr) y dormitorio (Br) para el Caso 1 (a), el Caso 2 (b) y el Caso 3 (c), durante el periodo representativo de 11 días.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 36. Evaluación de confort térmico en el periodo de invierno en los salones (Lr) y dormitorios (Br) de las viviendas caso de estudio: Caso 1 (a), Caso 2 (b), Caso 3 (c) y Caso 4 (d). Se presenta la comparación entre los tres modelos de confort adaptativo empleados en el análisis.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 37. Condiciones de invierno. Porcentaje de horas fuera de la banda de confort en el salón (Lr) y dormitorio (Br) de los casos de estudio: Caso 1 (a), Caso 2 (b), Caso 3 (c) y Caso 4 (d). Se presenta la comparación entre los dos modelos de confort y los dos perfiles de uso considerados.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 38. Condiciones de invierno. Desviación media de las IAT horarias en relación a los valores horarios de Top, en salón (Lr) y dormitorio (Br) para el Caso 1 (a), el Caso 2 (b), el Caso 3 (c) y el Caso 4 (d), durante el periodo representativo de 11 días.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 39. Evolución horaria de la tasa de concentración de CO<sub>2</sub> en los dormitorios de las cuatro viviendas durante el periodo representativo. Se indican, en líneas negras, los niveles considerados aceptables, buenos y muy buenos en [38].

Fuente: elaboración propia.

Fig. 40. Histogramas sobre la concentración de CO<sub>2</sub> y los niveles de IRH en los cuatro casos de estudio durante el periodo representativo de 11 días de invierno. A la izquierda (a) se muestra la distribución de horas nocturnas de acuerdo con el nivel registrado de CO<sub>2</sub>. A la derecha (b), la distribución de horas ocupadas totales de acuerdo con su nivel de IRH, considerando los valores medios entre dormitorio (Br) y salón (Lr) de cada vivienda.

Fuente: elaboración propia.

### Bloque A. Capítulo III.3. Sección 3.

Fig. 41. Tres vistas del edificio caso de estudio. A la izquierda, la fachada con la entrada a la Iglesia de San Gil, al final de la Calle Sagunto. A la derecha, dos imágenes del patio comunitario interior a través del cual se accede a las viviendas.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 42. Plantas del edificio caso de estudio en la calle Sagunto, 3 de Sevilla, donde las viviendas aparecen numeradas. En color ocre se han sombreado las superficies de uso comunitario: P: patio, T: terraza, FT: terraza sobre cubierta plana.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 43. Entorno urbano del edificio caso de estudio en la calle Sagunto, 3 de Sevilla. El perímetro del edificio aparece marcado en línea negra gruesa. A la derecha se ve la Iglesia de San Gil y más arriba el Arco de la Macarena de la Muralla Histórica, ambos monumentos declarados BIC.

Fuente: cartografía disponible en <https://sig.urbanismosevilla.org/Cartografia.aspx>; vuelo de agosto de 2011.

Fig. 44. Detalle del mapa de los monumentos con inscripción genérica o con declaración BIC en el Catálogo General del Patrimonio Histórico Andaluz de Sevilla, disponible en ide.SEVILLA [4]. En trama de color rosado claro se marcan sus entornos de protección. El perímetro del edificio caso de estudio aparece señalado en línea negra gruesa.

Fuente: Catálogo General de Patrimonio Histórico Andaluz en Sevilla disponible en <https://sig.urbanismosevilla.org/InicioIDE.aspx>

Fig. 45. Vistas de las terrazas de uso comunitario sobre las cubiertas del edificio caso de estudio. En la imagen de la izquierda es visible la torre de la iglesia de San Gil en el plano de fondo.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 46. Diagrama sobre la generación de los dos modelos energéticos del edificio caso de estudio: BC, edificio en su estado actual, y OC, edificio rehabilitado.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 47. Vista tridimensional del modelo de simulación energética.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 48. Evolución horaria de las temperaturas interiores en las tres plantas del edificio en el modelo BC.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 49. Evolución horaria a lo largo del año del índice PMV: invierno (a, d), media estación (b) y verano (c). El límite recomendado en la norma EN ISO 7730 para edificios de Categoría II ( $-0.5 < PMV < +0.5$ ) aparece marcado en línea negra gruesa.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 50. A la izquierda (a), cargas térmicas del edificio en el año 2017 normalizadas por superficie. A la derecha (b), porcentaje de contribución de cada elemento de la envolvente a las pérdidas térmicas totales anuales.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 51. Evolución mensual de cargas térmicas relacionadas con la envolvente (a) y con el comportamiento de los residentes (b). El cálculo se refiere al edificio completo para las condiciones climáticas del año 2017.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 52. Esquema del sistema híbrido propuesto.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 53. Esquema de cálculo del consumo de energía en los modelos BC y OC.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 54. Comportamiento del sistema híbrido en tres días representativos de invierno en la planta baja (a), de verano en la planta primera (b) y de primavera en la planta primera (c).

Fuente: elaboración propia.

Fig. 55. Evolución mensual de la energía producida y consumida por el sistema híbrido completo, incluyendo las tres plantas del edificio.

Fuente: elaboración propia.



Fig. 56. Eficiencia mensual media de las tres bombas de calor.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 57. Eficiencia mensual (a) y SPF (b) de las bombas de calor instaladas en cada planta del edificio caso de estudio.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 58. Porcentaje de horas en que el agua caliente se produce de manera renovable mediante la bomba de calor (línea anaranjada) en relación a la evolución mensual de demanda de calefacción y refrigeración en el modelo OC.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 59. Comparación entre el consumo de energía final anual del edificio en los escenarios BC y OC. A la izquierda (a) el consumo se agrupa según usos térmicos y no térmicos y se da también la suma total. A la derecha (b), se representa el desglose de consumo de los usos térmicos.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 60. A la izquierda (a), porcentaje de desviación de demanda, producción y consumo de energía final y primaria en el modelo OC con respecto al modelo BC. A la derecha (b), comparación entre la demanda anual de energía térmica del edificio en el estado OC y la energía producida por la ASrHP en kWh.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 61. Comparación de consumo de energía primaria en los escenarios BC y OC. A la izquierda (a), se representan los porcentajes de consumo de PE, renovable y no renovable, sobre el total. A la derecha (b), se indican los porcentajes de desviación de consumo de PE, renovable y no renovable, producidos en OC con respecto a los de BC.

Fuente: elaboración propia.

Fig. 62. Comparación del consumo unitario por superficie de energía primaria con los valores límites impuestos en el CTE DB HE0 para edificios no patrimoniales, en los estados BC y OC. A la izquierda (a), energía primaria total y a la derecha (b) porción no renovable.

Fuente: elaboración propia.

## Lista de tablas.

Fuente: todas las tablas incluidas en esta tesis son de elaboración propia.

### Bloque A. Capítulo III.2. Sección 2.

Tabla 1. Normas de protección aplicables a edificios catalogados C y D en el Conjunto Histórico de Sevilla

Tabla 2. Características generales de los edificios caso de estudio

Tabla 3. Resumen del procedimiento de recopilación de información sobre clima, forma y construcción y su aplicación.

Tabla 4. Resumen del procedimiento de recopilación de información sobre equipamiento y programa y su aplicación

Tabla 5. Características de los sistemas técnicos existentes en los casos de estudio

Tabla 6. Caracterización de la envolvente de los casos de estudio

Tabla 7. Valores de los parámetros ambientales monitorizados durante el periodo de verano

Tabla 8. Valores de los parámetros ambientales monitorizados durante el periodo de invierno

Tabla 9. Condiciones admisibles de calidad de aire interior

### Bloque A. Capítulo III.3. Sección 3.

Tabla 10. Datos de entrada en los modelos energéticos BC y OC.

Tabla 11. Análisis de confort térmico durante 2017 en el modelo BC.

Tabla 12. Valores de diseño para la evaluación del bienestar térmico en el modelo BC.

Tabla 13. Operación de la climatización en los modelos BC y OC.

Tabla 14. Transmitancia térmica ( $W/m^2K$ ) de los elementos de la envolvente en los modelos BC y OC.

Tabla 15. Datos de entrada en los modelos energéticos BC y OC.

Tabla 16. Desglose de consumo de energía final anual por usos térmicos en modelo OC (kWh).

Tabla 17. Resumen anual de demanda, generación y consumo de energía en los escenarios BC y OC del edificio caso de estudio (kWh).

## **Bloque B**



## Artículo 1

**Implementation of urban building energy modeling in historic districts. Seville as case-study.**

Caro-Martínez, R; Sendra, J.J. (2018)

International Journal of Sustainable Development and Planning 13(4), 528-540.

DOI: 10.2495/SDP-V13-N4-528-540



# IMPLEMENTATION OF URBAN BUILDING ENERGY MODELING IN HISTORIC DISTRICTS. SEVILLE AS CASE-STUDY

ROSANA CARO-MARTÍNEZ & JUAN J. SENDRA

Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad de Sevilla, Spain.

## ABSTRACT

Buildings represent 40% of the European Union's final energy consumption and are largely of residential use. From 2006 to 2016, existing European housing stocks have been analysed at national level to make the energy refurbishment processes transparent and effective. However, at the meta-scale of regions, cities or neighbourhoods, case-by-case analysis using Building Energy Models (BEM) becomes an unfeasible decision-support tool. To try to overcome this limitation, the nascent field of Urban Building Energy Modelling (UBEM) is making substantial progress in the assessment of building energy performance at urban scale. Still, most of the UBEM projects rely upon archetypes – i.e. virtual or sample buildings illustrative of the most frequent characteristics of a particular category, and the definition and description of such archetypes may compromise their reliability. This paper presents an alternative UBEM approach, especially designed for the homogeneous historic districts of cities where a significant proportion of the buildings are under preservation rules. These rules can restrict the scope of the measures to improve their energy efficiency or limit the possibility of implementing renewable energy systems. We introduce a new parameter (HAD) to classify blocks according to their heritage asset density. HAD is then mapped onto the study-area and the sample block is selected as representative of the most frequent HAD category. Using the historic ensemble of Seville as case-study, this paper shows results in energy consumption on a district scale and proposes a set of solutions to improve the energy efficiency of the buildings while respecting the heritage preservation rules. To support consistent policy decisions, validation of these results has been carried out, by in-situ monitoring of a representative number of dwellings.

*Keywords: energy demand, historic buildings archetypes, mediterranean climate, residential building stock, thermal rehabilitation, urban building energy modelling, urban heritage protection.*

## 1 INTRODUCTION

In accordance with Europe 2020 targets about climate change and energy sustainability, DIRECTIVE 2012/27/EU on energy efficiency came into force for all the States in 2013. According to its Article 4 concerning building renovation, Member States may decide not to apply the energy efficiency requirements to 'buildings officially protected as part of a designated environment, or because of their special architectural or historical merit, in so far as compliance with certain minimum energy performance requirements would unacceptably alter their character or appearance'.

The combined application of energy retrofit with renewable energy to protected buildings in historic districts can bring several beneficial effects: first, it can help to attain EU climate targets; second it could make the use and occupation of housing in these districts more attractive, reducing costs and improving comfort for dwellers; and it may also counteract the ongoing commodification of whole historic districts which now recognized as a cause of unsustainable metropolitan imbalances. However, according to the EFFESUS Research Project [1], most European countries, following Article 4, decided to waive the energy efficiency measures when it comes to protected historic buildings or environments. Why?

Renovation of historic buildings is perceived as a cultural risk, and therefore, local legislations establish restrictions to the transformations potentially applicable, with stricter rules the higher the relevance or uniqueness of the heritage assets of the building or environment. Nonetheless, a major part of protected buildings in Europe are not monuments of outstanding artistic or historic value, but rather buildings catalogued with lower levels of protection. As a consequence, the range of authorized transformations may be significant. As the exception contained in Article 4 aforementioned does not discriminate between monuments of high protection levels and other protected buildings with lower levels, and taking into account that the vast majority of buildings in historic ensembles are of residential use, the political decision to waive energy efficiency requirements to renovations in historic districts, sentences them to comfort obsolescence or to energy wasting, without a thorough consideration of the socio-economic consequences.

In Europe 28, the percentage of dwellings older than 1945 (in total residential stock) has a mean value of 22.69% [2]. European residential stock is responsible for 25% of total energy consumption [3]. In Spain 12.84% of the total number of dwellings are older than 1945 but half of the residential building stock were constructed before 1981 [4], year in which the first regulation concerning energy saving was mandatory. Spanish residential building stock accounts for 17% of total energy consumption [3]. Incentives encouraging Spanish owners to improve their buildings energy performance (protected or not) are usually implemented at regional or municipal level. They are taken irregularly and based in general assumptions and standard, partly inaccurate and untested, energy efficiency ‘formulas’.

The importance of designing new integrated approaches to implement measures for energy balance improvement, cost reduction and reducing carbon footprint while respecting protection requirements in historic districts is quickly rising (see, for example, Refs. [5] and [6]), and some EU research programs have been devoted to this aim [7–9]. Since significant cultural values make retrofitting process in heritage buildings more complex, specific analytical tools and methods should be developed. While BEM (Building analysis of Energy Models) has proven useful in the analysis of single buildings, it becomes impractical at the meta-scale of regions, cities or even neighbourhoods. In recent years, substantial progress has been made to assess building energy performance at urban scale and a nascent field of research called urban building energy models (UBEM) [10, 11] is expected to contribute to solve the question. Still, most of the UBEM projects rely upon archetypes, i.e. virtual or sample reference buildings illustrative of the average building in terms of climatic conditions and functionality. As there is no standardized method to determine them, using these archetypes may compromise the reliability of the UBEM methods.

The aim of this work is to present an alternative UBEM method designed for morphologically homogeneous historic districts where a significant proportion of their buildings are under preservation rules. The method proposed, focused on residential use, takes heritage value into account in the parametrization process and quantifies block-scale heritage assets. Using Seville (Spain) as case-study, it delivers dynamic-simulation results on thermal behaviour for the quantification of the potential capacity of historic ensembles to implement existing and new decarbonisation technologies at the district-scale “without harming the heritage values and minimizing/eliminating all risks for the buildings themselves” [12].

## 2 METHODOLOGY

In this alternative UBEM approach, based on archetypes of blocks, heritage values of the buildings were taken into account for urban segmentation. Especial attention was paid to the



method for choosing the sample-block, as its calculated energy balance would be thereafter, scaled up to the neighbourhood level. From individually simulated sample-buildings (working with multi-zone dynamic thermal modeling) extracted from the sample-block, up-scaling of results to block level was made by apportionment of the results per solar orientation and floor area. The GIS tool ArcMap 10.2.1© was used in order to describe the spatial distribution of heritage assets in the study-area and to map its frequency distribution. Shapefile data containing heritage listing grades of buildings were kindly provided by the Sevilla City Planning Department.

## 2.1 Case-study

Seville (Andalucía, Spain) was chosen as case-study because of four main reasons: firstly, Seville contains a large historic urban complex designated as ‘Conjunto Histórico’ since 1990 and catalogued at regional level as ‘Bien de Interés Cultural’, the highest protection grade existing in Spain. It spans 5.54% of the municipal area and holds 8.5% of its total population [12]. Secondly, it contains the Cathedral-‘Alcázar’-‘Archivo de Indias’ ensemble, which is listed in the World Heritage List since 1987. This fact directly affects the potential urban transformations in a 100 metres radius around it, or even farther if its visual integrity were affected. Thirdly, over the last 30 years, the ‘Conjunto Histórico’ has been under a special plan with binding policies concerning building preservation, refurbishments and demolition, as well as urban infrastructure, resulting in the homogeneity in shapes, materials and proportions that have reached us; and lastly, 62% of its buildings are protected (6.875 of 11.029).

The local policy on heritage protection classifies the building stock within the ‘Conjunto Histórico’ in four grades of protection: A and B (for monuments), C for buildings of typological interest and D for buildings, which contribute to maintain urban identity. Listing grades are assigned case-by-case.

## 2.2 Study-area

As this work is focused on historic housing, in order to deduce consistent energy balance results at district level from the calculated outcomes at block level, the morphological homogeneity of the urban district was considered relevant. Consequently, the study-area selected (Fig. 1) comprises the urban land enclosed inside the XII century defending city walls limits. It covers 345.53 hectares. Its current population is 59721 inhabitants, living in 539 blocks and 10559 buildings, of which 67% are listed (7050 buildings) [13]. Relative to the south sector, the north sector is more densely populated and more homogeneous morphologically, showing a prevalence of housing and traditional commerce. Therefore, the sample block will be selected from the north sector.

In the study-area, grades A and B listed buildings represent 5.7% of the existing stock and 8.6% of the listed pool; the rules preserving its heritage assets may restrict considerably the scope of energy retrofits or renewable energy systems implementation. Yet, grades C and D listed buildings represent 60% of existing stock and 90% of the listed pool; their possibilities of transformation are much wider, so it is on these buildings where the potential for improvement of the historic city resides.

Every block in the study-area holds a specific mixture of buildings listed or not, in variable number and protection grade. A typical block is a compact assembly of a variable number of three or four-floor buildings with flat roofs. Each building usually occupies an oblong plot

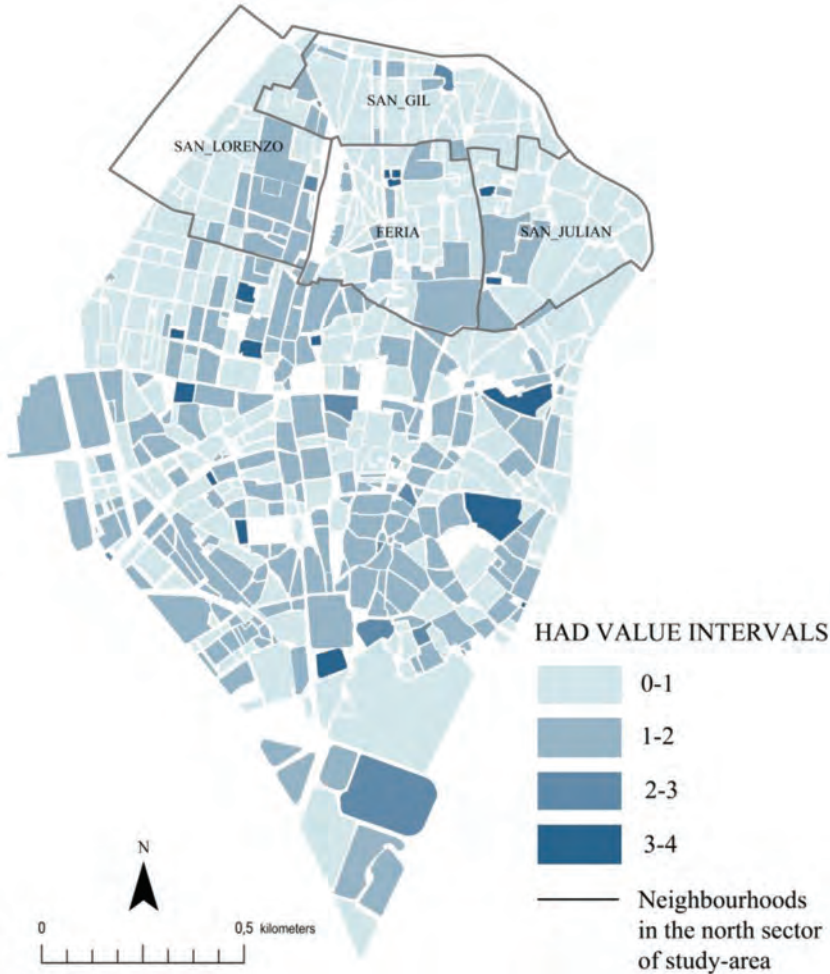


Figure 1: Heritage asset mapping. Spatial distribution of Heritage Asset Density (HAD) within the study-area.

between two partition walls that divide the properties. The back area of each plot remains empty to provide light and ventilation. Single family houses alternate evenly with multi-family houses. If the plot size is broad enough, some houses have a patio. It is common that the ground floor is dedicated to garage or commercial use.

### 2.3 Method for block and buildings samples selection

The methodology proposed involves proceeding in three stages. On Stage 1 a new parameter to quantify block-scale heritage assets was defined, 'Heritage Asset Density' (HAD). HAD value for each block in the study-area was calculated using the GIS tool ArcMap 10.2.1 © and the results were represented in a map (Fig. 1). The frequency distribution of HAD values, according to GIS results, was represented in the histogram shown in Figure 2. Thus, the study-area building stock (539 blocks) became segmented in four block-archetypes,

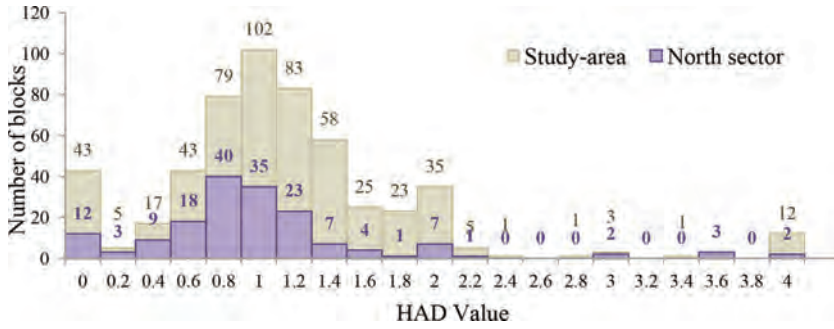


Figure 2: Histogram showing the comparison of frequency distribution of HAD value between study-area and north sector.

depending on the four intervals of HAD values established. The histogram provides the information about the average heritage heterogeneity, i.e. the most frequent combination of listed and not listed buildings. Blocks included in the most frequent interval are considered representative of the whole urban heritage asset and therefore candidates to become the simulated sample-block.

For each block, individual buildings were assigned an integer from 1 to 4 corresponding to their grading from D to A, respectively. HAD was then calculated as the sum of integers in the block divided by the number of buildings, thus representing the block’s weighted average of heritage asset. HAD is independent of the land area occupied by the block or the constructed area it holds. Within the north sector (four neighbourhoods, 167 blocks, 24331 inhabitants) the most frequent HAD values are in the interval: 0.60–1 and 85 blocks (51%) meet that condition, as shown in Figure 2.

On Stage 2, the selected sample block was described. It is bounded by *Feria* (F), *Relator*(R), *Antonio Susillo* (AS) and *Señor de la Sentencia* (SS) streets (Fig. 3) and contains 23 buildings. Besides having the average HAD value, this block (hereafter called ‘sample-block’) presents other major advantages such as its regular shape and its almost exact solar orientation of its street façades. On the basis of information provided by the Cadastre [14], it was characterized according to three parameters: technical regulation period in which each building was

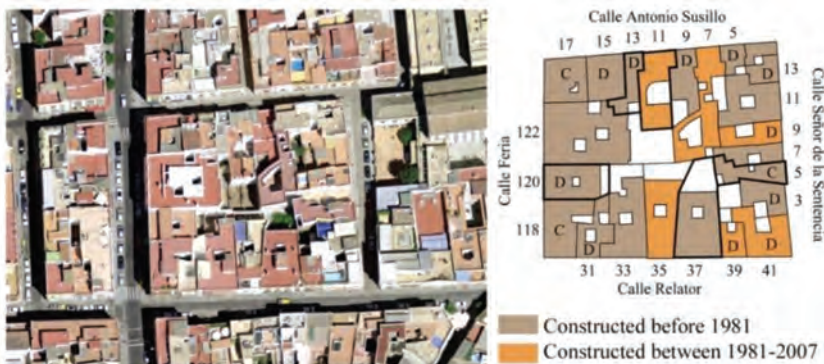


Figure 3: Sample block. Aerial photography (a); Plan with classification of buildings depending on technical regulation period and heritage listing grade (b).

constructed or fully refurbished, listing grade and typology. Regarding regulation periods, two national-level legislative historic landmarks are relevant: 1981, year in which the first legislation on thermal isolation in buildings came into force (NTE-CT-79) [15] and 2007, when a more stringent mandatory energy technical code was implemented. Although this 2006 code was replaced by its 2013 version, stricter in terms of energy saving and energy efficiency, none of the 23 buildings was constructed or refurbished after 2006. Therefore, buildings within the sample-block were divided in two groups: one constructed or comprehensively refurbished before 1981, and a second group, between 1981 and 2007 (Fig. 3). Concerning typology, all the buildings are XX century storey-houses divided in two categories: single-family buildings (52%) and multi-family buildings (48%). Although all of them are of mandatory residential use, local regulations allow owners to use ground the floor as car-garage or as commercial premises.

On Stage 3, a group of five buildings was selected for thermal modeling. Their main characteristics are shown in Table 1. They all have flat roofs and none of them have basement. Heritage preservation rules for grades C and D are extracted from 'San Gil-Alameda' sub-district special plan. Among other elements, this plan protects the façades (original colours and materials, ornamental elements, forms and position of cornices, size and form of openings, mouldings of windows and doors, carpentry, locksmith's crafts) and roof typology.

#### 2.4 Simulation method and conditions

CAD format building geometry was obtained from the Cadastre [14]. Heights and façade openings were approximated by on-spot verifications. The software Design Builder v.2.4.2.026 © was chosen for dynamic thermal simulation. Each building was divided in thermal zones according to floors and the shading and reflection effects of surrounding buildings were taken into account. The model does not consider thermal bridges and assumes high level air permeability of all openings. Surfaces of sample buildings in contact with adjacent ones were considered adiabatic, as both share similar thermal conditions. Parking and commercial spaces were removed from the simulation model as their thermal-conditioning and use patterns differ much from those of residential use. Surfaces adjacent to these spaces were considered adiabatic. In order to establish the operational conditions, the standard values contained in official documents were used [16–19]. Energy demand reference values of existing residential buildings in Seville were: 16.6 kWh/m<sup>2</sup> for heating, 23.4 kWh/m<sup>2</sup> for cooling and 12.3 kWh/m<sup>2</sup> for domestic hot water [17]. The energy demand stipulated in current

Table 1: Main characteristics of the sample buildings.

Building id.	Construction date (**)	Listing grade	Typology (*)	Ground floor use	Façade solar orientation	Usable surface (m <sup>2</sup> )
R37	2006	–	MF-4	Commercial	South	690
F120	1960	D	MF-4	Residential	West	539
AS11	2004	–	MF-3	Residential	North	321
AS13	1960	D	SF-4	Commercial	North	195
SS5	1945	C	MF-3	Residential	East	252

(\*) MF-X: multi-family X storey house / SF-X: Single-family X storey house

(\*\*) or full refurbishment date

legislation is more restrictive: 15 kWh/m<sup>2</sup> for heating and 20 kWh/m<sup>2</sup> for cooling. Non-renewable primary energy consumption maximum annual levels extracted from current legislation are depicted in Figure 4b. For the climatic zone of Seville, default values for thermal transmittance of constructive elements, depending on regulation period [16] are shown in the following Table 2.

## 2.5 Data input

Seville (Latitude: 37, 42°N, Longitude: -5, 90°W) is located in a Mediterranean climate area, corresponding to Csa in the Köppen-Geiger climate classification [20] and included in zone B4 of the Spanish climatic zoning. Climate data came from ASHRAE, International Weather for Energy Calculations [21]. Fuel type was considered the same for all the buildings: natural gas from the public grid for domestic hot water and electricity supplied by public grid for household appliances and HVAC systems. All buildings were given the same values for activity characterization (occupancy schedule on workdays 0% from 8 to 16 h and 100% from 16 to 8 h; on weekends and holidays 100% from 0 to 24 h conforming to typical Spain holiday schedule), natural ventilation (4 ac/h by window opening from 1 to 8 h summer local time), window protection (exterior blinds of medium reflectivity slats, working 100% on in summer from 11 to 21 h) and lighting (minimum 150 lux, heat gain of 5 W/m<sup>2</sup>, workdays from 6 to 8 h and from 16 to 24 h; and weekends and holidays from 9 to 24 h), miscellaneous heat gain of 5 W/m<sup>2</sup>, domestic hot water (60°C, consumption of 12.30 kWh/m<sup>2</sup> [17] and environmental control systems (splits without mechanical ventilation, set point temperatures 21°C for heating and 25°C for cooling )

## 3 THERMAL MODELLING

### 3.1 Results and discussion of energy balance of current model.

According to simulation results shown in Table 3, AS13 and R37 complies with current energy demand limit values. Compactness and favourable solar orientation respectively might explain this good behaviour. On the other hand, thermal performance of AS11, whose

Table 2: Definition of thermal standards in current model for climatic zone B4.

Parameter	Unit	Before 1981	1981–2007	2007–2014	Post 2014
Façade U-value	W/m <sup>2</sup> K	2.38	1.8	0.82	0.38
Roof U-value	W/m <sup>2</sup> K	2.17	1.4	0.45	0.33
Ground floor* U-value	W/m <sup>2</sup> K	1	1	0.82	0.38
Slabs** U-value	W/m <sup>2</sup> K	2.17	2.17	0.52	0.52
Window U-value (***)	W/m <sup>2</sup> K	5.7	5.24	4.2	-
Solar Factor		0.82	0.82	-	-
Infiltration	m <sup>3</sup> /h m <sup>2</sup>	100	100	50	50

\* Up to 0,5 m deep

\*\* Above non thermal-conditioned space

\*\*\* Frame and glass combined

Table 3: Energy balance results of current model simulation.

Parameter	Units	Sample building					
		AS11	AS13	SS5	R37	F120	Block
Façade solar orientation		North	North	North (average)	East	South	West
TRP (1)		1981-2007	Before 1981		Before 1981	1981-2007	Before 1981
Heating (2)	kWh/m <sup>2</sup>	23.4	12	17.7	24.32	15.89	19.03
Cooling (2)	kWh/m <sup>2</sup>	23.89	15.73	19.81	18.22	17.34	21.81
NREPC (3)	kWh/m <sup>2</sup>	109.73	70.29	90.01	100.01	81.33	108.26
CO <sub>2</sub> (4)	kg/m <sup>2</sup>	70.05	68.06	69.055	60.97	57.39	77.50

(1) Technical regulation period

(2) Annual energy demand values

(3) Non-renewable primary energy consumption annual values

(4) Emissions annual values

façade is equally solar-oriented than AS13, is much worse, even though it was constructed in the period in which insulation was compulsory. Its major proportion of façade in relation with its surface (shape-factor indicator) might explain this case. Altogether, heating and cooling demand values do not deviate significantly from the compulsory limit values for a building constructed today. In contrast, non-renewable primary energy consumption deviation (Fig. 4b) is mucho more considerable (on average 1.97 times the limit value). The largest deviation arises in heating demand, where only 40% of the buildings comply with the current threshold (Fig. 4a). This result is in accordance with those obtained by Sendra *et al.* [22, 23] and Girón *et al.* [24] for social housing in the same city; yet those values are much more higher than the values obtained in this study. Historic sample-buildings appear to use less energy than those analysed by the mentioned authors for the same city, built between 1955 and 1960 under Modern Movement design and constructive premises and with less

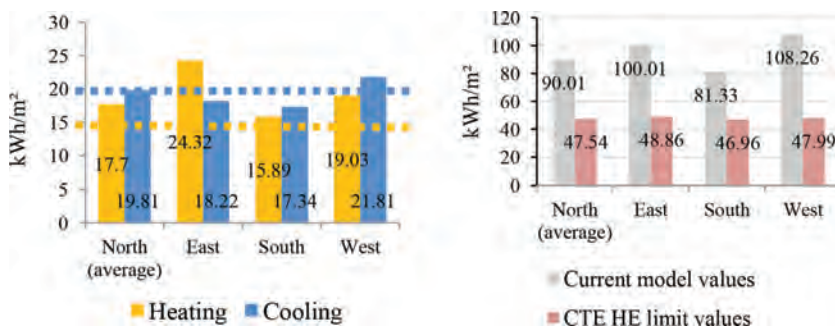


Figure 4: Energy balance results of current state by façade solar orientation. (a) Annual thermal energy demand; (b) Non-renewable primary energy consumption.

favourable shape-factor. Technical regulation period does not seem to be relevant for thermal performance of buildings: the pair of samples which globally behave best (AS13 and R37) were constructed in different periods, while the worst accomplishment is carried out by a building constructed in the period 1981–2007(AS11), when thermal insulation of walls and roof was binding.

Summarizing, regarding combined thermal demand, 40% of the studied buildings demand less energy than the current limit value, and all deviate less than 30% of it. The buildings perform better for cooling (100% either complain or deviate less than 30%) than for heating (60% either complain or deviate less than 30%).

Up-scaling of results to block level was made by considering that the solar-orientation of the buildings' façades plays the most important role in thermal performance, as results seem to indicate. The results obtained as per solar orientation were next multiplied by the floor-area weighted of the complete block. Surfaces of corner buildings were equally divided to both solar-orientations. Comparison with the current limits is shown in Figure 5.

The current state sample-block complies with and even surpasses by 4% the current limit value in cooling demand. This means that the energy needed to maintain comfort conditions in summer is 4% lower than the energy needed for the same purpose by another block in Sevilla built after 2013 under the present legislation. Conversely, heating demand is not as favourable. The maintenance of the comfort conditions in winter demands 24% more energy than the reference present-day block aforementioned. For 100% of the sample-buildings energy supply comes from electricity and natural gas public grid and in Spain only 6 % of the primary energy consumption (energy delivered to the consumer for being transformed in usable energy) derives from renewable sources [25]. Therefore, CO<sub>2</sub> emissions are high. Current model block would obtain an E rating in CO<sub>2</sub> emissions according to national system, compared to the compulsory energy rating A for any building constructed today.

### 3.2 Potential for improvement of the sample block

Once the results were analysed, three different sets of improvement measures (S0, S1, S2) were applied to the sample buildings depending on their individual balance. Five improvement measures were considered: Ia, Ib, Ic, Id and Ie. The three sets were: S0 = Ia + Ib, S1 = Ia + Ib + Ic and S2 = Ia + Ib + Ic + Id + Ie. S0 and S1 are two different combinations of passive solutions, while S2 is a mix of solutions that include thermal transmittance improvements of the building envelope elements up to the threshold values.

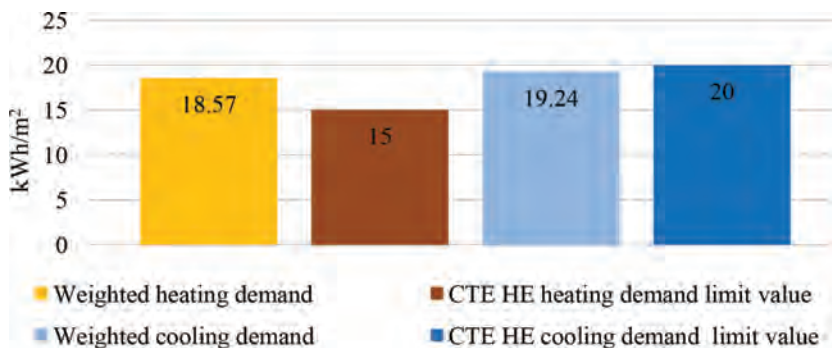


Figure 5: Weighted thermal demand for the sample-block compared with current thresholds.

Improvement measures describes as follows: *Ia*: use of more efficient lamps and linear control systems implementation the decrease the lighting demand from 5 W/m<sup>2</sup> to 3.30 W/m<sup>2</sup>; *Ib*: implementation of household water saving devices to reduce water consumption from 28 litres to 21 litres per person and day, and a decrease in domestic hot water energy demand from the reference value of 12.30 kWh/m<sup>2</sup> [17] to 9.23 kWh/m<sup>2</sup> [26]; *Ic*: increasing natural night-time ventilation period in summer from 7 (1–8 h) to 10 hours (22 h–8 h); *Id*: improving the thermal transmittance and airtightness of openings, up to the CTE thresholds. This solution includes the replacement of 100% of existing window frames, with no-thermal bridge break, for new aluminium frames with thermal break ( $U_{\text{frame}} = 4.72 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) and replacement of existing 6 mm single-glass panes for new 6/16/6 double-glazed generic clear glass panes of thermal conductivity  $\lambda = 0.90 \text{ W/mK}$  and SF.077. In case the building demands excessive cooling energy, a solar control glass pane is placed on the outside ( $U_{\text{glass1}} = 2.65 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). The new thermal transmittance aggregate value (frame-glass) was  $U_{\text{opening1}} = 3 \text{ W/m}^2\text{K}$ . In case the building demands excessive heating energy, gas argon substituted air into the internal chamber of the double glazing windows ( $U_{\text{glass2}} = 2.56 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), being the new thermal transmittance aggregate value (frame-glass) of  $U_{\text{opening2}} = 2.93 \text{ W/m}^2\text{K}$  (M4). Airtightness of openings is shortened from 100 to  $\leq 50 \text{ m}^3/\text{h m}^2$  for all cases. Finally, *Ie*: reinforcement of external insulation with mineral wool panels of thermal conductivity  $\lambda = 0.031 \text{ W/mK}$ . Depending on the building performance, two different panel thicknesses were applied: 50 or 80 mm.

Façades of C and D buildings cannot be covered according to the local preservation policy. In order to provide coherence to a hypothetical global refurbishment, the façades of non-protected buildings were considered as if they were protected as well. As such, only the interior courtyard walls were susceptible to be covered with insulation panels. For each building, depending on the proportion of the courtyard wall surface covered needed to attain thermal transmittance limit value (0%, not larger than 50%, between 50 and 70% or between 70 and 100%), four intensity of intervention levels (1, 2, 3 and 4) were respectively established, regardless of the particular panel thickness (50 or 80 mm) used.

### 3.3 Results and discussion of sample-block retrofit

*Ia* and *Ib* improvement measures were applied to all cases. *Ic* was applied to all the buildings except for AS13. *Id* was applied to all buildings excluding AS13 and R37, whose energy demand values don't exceed current limit values. So, three out of five buildings envelopes were enhanced with 6/16/6 double-glazed glass panes mounted on aluminium thermal-break frames in the 100% of the window openings. *Ie* improvement measure was applied to all buildings excluding AS13 and R37.

The application of the measures described above would ensure that all the sample-buildings would reduce their thermal energy demand up to current binding values, without worsening comfort conditions. Transformations in roofs or ground floors, schedules (except for night-ventilation *Ic* measure), operation schemes of occupancy and lighting, electric appliance gains and solar protection of windows systems were not needed.

According to the results shown in Table 4, the study concludes that 40% of the buildings required only passive measures (S0 and S1) and intervention of grade 1 (neither window frames and glass panes replacement nor external insulation panelling); 40% of the buildings required also non-passive measures (S2) and intervention of grades 2 and 3 (100% window frames and glass panes replacement and external insulation panelling on less than 70% of the internal courtyard walls surface) and 20% of the buildings required also non-passive



Table 4: Results of improvement capacity of the block analysis.

Parameter	Sample building				
	AS11	AS13	SS5	R37	F120
Improvement set applied	S2	S0	S2	S1	S2
PS (*)	100%	0%	50–70%	0%	≤50%
Intensity of intervention	4	1	3	1	2

(\*) Percentage of wall surface covered with external insulation

Table 5: Comparison on non-renewable primary energy consumption

Building	Improvement set	Current threshold	Current state	Modified state
AS11	M4	48.12	121.31	77.29
AS13	M0	49.96	70.29	66.64
R37	M0	46.96	91.52	93.21
SS5	M3	48.86	100.01	69.4
F120	M2	47.99	108.26	91.21

measures (S2) and intervention grade 4 (100% window frames and glass panes replacement and external insulation panelling on 100% of the internal courtyard walls surface).

As the energy sources have not changed, all enhanced sample-buildings far exceed from the non-renewable primary energy consumption current threshold, as shown in Table 5.

#### 4 CONCLUSIONS

Considering residential use, technical regulation periods and Heritage Asset Density (HAD) value as categorization parameters of the city case-study, the UBEM approach presented has obtained results from a generalizable block type which may serve to extrapolate the sort of general measures, and their costs, that would be needed to reduce energy usage at the scale of a historic neighbourhood.

Our results indicate that these measures are not far-fetched: the kind of interventions we have modeled on the buildings in order to decrease energy demand of the block down to current binding values, without worsening comfort conditions, and the intensity of such interventions, appear to be feasible. Heritage assets of the sample-buildings, which represent the most common kind of building in terms of heritage value, were not affected by the enhancements works proposed.

Therefore, the main conclusion is that the principal problem for the energy retrofit of Seville historic districts is not energy demand which, in global terms, does not exceed much the current limit values. The main problem is the excessive CO<sub>2</sub> emissions: as the origin of the energy used to maintain the comfort conditions inside the buildings derives mainly from fossil fuels [25], the buildings are not particularly wasteful, but polluting.

While our work indicates that measures to reduce energy demand may be at hand (40% would require only passive methods), reduction of carbon emissions will need of different strategies involving renewable energy sources. Distributed power generation together with

mixed systems able to work with renewable and non-renewable sources are the key to long-term sustainability of historic districts.

#### REFERENCES

- [1] von Rettberg, B. & Rodriguez-Maribona, I., *Assessment of European and national policies related to energy efficiency and heritage conservation. EFFESUS Project Deliverable D1.3*, 2013.
- [2] von Rettberg, B. & Rodriguez-Maribona, I., *European building and urban stock data collection. EFFESUS Project Deliverable D1.1*, 2013.
- [3] IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, ‘*Project Sech-Spahousec, Analysis of the Energetic Consumption of the Residential Sector in Spain*’, 2016.
- [4] Ministerio de Fomento. Gobierno de España., ‘*Estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España, en desarrollo del Artículo 4 Directiva 2012/27/UE*’, 2014.
- [5] Pracchi, V., Historic buildings and energy efficiency. *The Historic Environment: Policy & Practice*, 5(2), pp. 210–225, 2014.  
<https://doi.org/10.1179/1756750514z.00000000052>
- [6] Fouseki, K. & Cassar, M., Energy efficiency in heritage buildings. future challenges and research needs. *The Historic Environment: Policy & Practice*, 5(2), pp. 95–100, 2014.  
<https://doi.org/10.1179/1756750514z.00000000058>
- [7] Intelligent Energy Europe Programme of the European Union, ‘*IEE Project TABULA. Typology approach for building stock energy assessment*’, 2012. [Online]. Available at: <http://episcopes.eu/iee-project/tabula/>
- [8] Intelligent Energy Europe Programme of the European Union, ‘*IEE Project EPISCOPE. Energy performance indicator tracking schemes for the continuous optimisation of refurbishment processes in European housing stocks*’, 2016. [Online]. Available at: <http://episcopes.eu/iee-project/episcopes/>
- [9] Vieites, E., Vassileva, I. & Arias, J.E., European initiatives towards improving the energy efficiency in existing and historic buildings. *Energy Procedia*, 75, pp. 1679–1685, 2015.  
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.418>
- [10] Reinhart, C.F. & Cerezo Davila, C., Urban building energy modeling - a review of a nascent field. *Building and Environment*, 97, pp. 196–202, 2016.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.001>
- [11] Monteiro, C.S., Pina, A., Cerezo, C., Reinhart, C. & Ferrão, P., The use of multi-detail building archetypes in urban energy modelling. *Energy Procedia*, 111, pp. 817–825, 2017.  
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.244>
- [12] Ayuntamiento de Sevilla, Portal de Datos Abiertos del Ayuntamiento de Sevilla | Catálogo de Datos. [Online]. Available at: <http://datosabiertos.sevilla.org/data/>
- [13] Ayuntamiento de Sevilla, ‘ide.SEVILLA’. [Online]. Available at: <http://sig.urbanismo-sevilla.org/InicioIDE.aspx>
- [14] Ministerio de Hacienda y Función Pública, ‘Sede Electrónica del Catastro’. [Online]. Available at: <https://www.sedecatastro.gob.es/>
- [15] *Real Decreto 2429/1979, de 6 de julio, por el que se aprueba la norma básica de la edificación NBE-CT-79, sobre condiciones térmicas en los edificios*, pp. 24524–24550, 1979.

- [16] IDAE, Instituto para la diversificación y Ahorro de la Energía. '*Manual de fundamentos técnicos de certificación energética de edificios existentes CE3X (004,2)*', 2015.
- [17] IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. '*Condiciones de aceptación de procedimientos alternativos a LIDER y CALENER. Anexos*', *Efic. y Ahorr. energético*, 2009.
- [18] Ministerio de Industria, Energía y Turismo. '*Factores de emisión de CO2 y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector de edificios en España*', p. 16, 2016.
- [19] Secretaria de Estado de Energía. '*Reglamento de las instalaciones térmicas en los edificios*', 2013.
- [20] Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. & Rubel, F., World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), pp. 259–263, 2006.  
<https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- [21] 'International Weather for Energy Calculations | ashrae.org'. [Online]. Available at: <https://www.ashrae.org/resources--publications/bookstore/international-weather-for-energy-calculations>
- [22] Sendra, J.J., *Proyecto Eficacia: optimización energética en la vivienda colectiva*. Secretaria de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, Sevilla, 2011.
- [23] Sendra, J.J., Domínguez Amarillo, S., Bustamante Rojas, P. & León Rodríguez, A.L., Energy intervention in the residential sector in the south of Spain: Current challenges. *Informes de la Construcción*, 65, pp. 457–474, 2013.  
<https://doi.org/10.3989/ic.13.074>
- [24] Santamaría, J., Girón, S. & Campano, M.A., Economic assessments of passive thermal rehabilitations of dwellings in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 128, pp. 772–784, 2016.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.035>
- [25] Ministerio de Industria Energía y Turismo. '*La Energía en España 2015*', 2016.
- [26] Universidad de Sevilla, Universidad Pablo de Olavide, '*Aqua-Riba. Guía Para La Incorporación De La Gestión Sostenible Del Agua En Áreas Urbanas*', 2015.

## Artículo 2

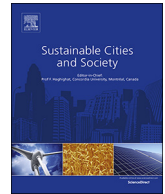
**Evaluation of indoor environment and energy performance of dwellings in heritage buildings. The case of hot summers in historic cities in Mediterranean Europe.**

Caro, R.; Sendra, J.J. (2019)

Sustainable Cities and Society 52, 101695, 1-12

DOI: [10.1016/j.scs.2019.101798](https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101798)





# Evaluation of indoor environment and energy performance of dwellings in heritage buildings. The case of hot summers in historic cities in Mediterranean Europe

Rosana Caro\*, Juan José Sendra

Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Av. de Reina Mercedes 2, Sevilla, 41012, Spain

## ARTICLE INFO

### Keywords:

Mediterranean city  
City decarbonisation  
Historic city  
Architectural heritage  
Residential heritage  
Historic buildings  
Thermal comfort  
Occupant behaviour  
Energy efficiency  
Energy retrofit

## ABSTRACT

The potential benefits for making the historic buildings of heritage cities non-polluting and energy efficient have only recently stirred the interest of researchers and policy makers in facing the necessary challenges. In southern Europe, most of these buildings are residential and are mainly listed at low grades of protection, allowing for significant transformation.

This article quantitatively evaluates the indoor environment and energy performance of the residential heritage building stock under the severe summer conditions characteristic of the Mediterranean climate zone. The historic centre of Seville (Andalusia, Spain) is used as a case study. Three dwellings located in representative listed buildings within its conservation area were monitored and analysed taking occupant behaviour into account. The findings show that many dwellings may lack thermal comfort conditions, which cannot always be guaranteed by passive strategies alone. In addition, these buildings are more polluting than recently constructed ones because they depend entirely for their energy supply on the public electricity grid. Interestingly, in most cases reducing the mechanical cooling demand would not require intrusive physical interventions, but would largely rely on suitable window shading and nightly natural ventilation when outdoor conditions allow.

## 1. Introduction

According to recent findings from the UN (United Nations, 2019) further action is needed to meet energy goals by 2030, and efficiency efforts must focus on the limited overall progress on renewable energy and the increasing energy intensity of the residential building sector. One of the major challenges lies in historic buildings and cities where energy retrofits - despite their considerable potential for reducing energy use - are still perceived as a cultural risk since the conservation principles regulating their treatment might interfere with the renovation plans (Webb, 2017). This explains why most European countries chose to waive energy efficiency measures in officially protected buildings, as permitted in Article 5 of Directive 2012/27/EU on energy efficiency.

Nevertheless, in recent years an increasing number of researchers and policy-makers, motivated by a new sustainability-centred heritage

conservation approach in line with the current 'UNESCO Recommendation on the Historic Urban Landscape (UNESCO, 2011)' and The Valletta Principles (ICOMOS, 2011), have started to perceive the exclusion of historic building stocks from the urban decarbonisation procedures as a risk which would condemn these historic districts 'to comfort obsolescence or to energy wasting' (Caro-Martínez & Sendra, 2018) and jeopardize their healthy survival. Accordingly, major EU research programs on urban heritage rehabilitation were launched between 2013 and 2016 (3encult, 2019; Climate for Culture, 2019; EFF-ESSUS, 2019) generating an increase in the literature (Lidelöw, Örn, Luciani, & Rizzo, 2018; Martínez-Molina, Tort-Ausina, Cho, & Vivancos, 2016). The balance between energy consumption reduction and conservation principles was the dominant criterion in this period of growth (Webb, 2017), due to a pressing need to conserve the physical integrity of historic buildings. As a result, this field of research continues to focus excessively on construction materials and technical measures, relating

*Abbreviations:* BEM, building energy model; CTE-HE, Spanish energy code; IRH, indoor relative humidity (%); IAQ, indoor air quality; IAT, indoor air temperature (°C); MM, mixed mode adaptive thermal comfort model for hybrid buildings; NNVC, natural night ventilation cycle; NNVE, natural night ventilation effectiveness; OAT, outdoor air temperature (°C); ORH, outdoor relative humidity (%); TSC, thermal stability coefficient; T<sub>op</sub>, optimal indoor operative temperature (°C); T<sub>o</sub>, outdoor reference temperature (°C)

\* Corresponding author.

E-mail address: [rosanmar2@alum.us.es](mailto:rosanmar2@alum.us.es) (R. Caro).

<https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101798>

Received 30 April 2019; Received in revised form 18 June 2019; Accepted 22 August 2019

Available online 30 August 2019

2210-6707/ © 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

### **Artículo 3**

**Are the dwellings of historic Mediterranean cities cold in winter? A field assessment on their indoor environment and energy performance.**

Caro, R.; Sendra, J.J. (2021)

Energy and Buildings 230, 110567, 1-18

DOI: [10.1016/j.scs.2019.101798](https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101798)







# Are the dwellings of historic Mediterranean cities cold in winter? A field assessment on their indoor environment and energy performance



Rosana Caro <sup>\*</sup>, Juan José Sendra

Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Av. de Reina Mercedes 2, Seville 41012, Spain

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 25 June 2020

Revised 8 September 2020

Accepted 14 October 2020

Available online 20 October 2020

### Keywords:

Mediterranean city  
City decarbonisation  
Historic city  
Historic buildings  
Residential heritage  
Indoor air quality  
Thermal comfort  
Energy efficiency  
Occupant behaviour  
Cold indoors

## ABSTRACT

Although European heritage buildings are excluded from energy efficiency targets, it would be beneficial to include the largest group, that of listed housing, in energy retrofit plans, in order to encourage its occupation and contributing to the sustainable maintenance of historic cities. This requires reliable experimental studies, which have been rare so far, in order to establish energy rehabilitation plans that do not jeopardize the conservation of their values. This paper aims to contribute to addressing this gap. It evaluates the energy performance and indoor environmental quality of dwellings within listed buildings of the conservation area of Seville, Spain, in the Mediterranean climate zone, under actual winter use and occupation conditions. An experimental campaign was conducted, generating energy models and measuring rates of indoor air temperature to validate them. The findings highlight important health and environmental issues: despite the mild winters of southern Spain, intensive use of the heating system is needed to maintain thermal comfort indoors, increasing polluting emissions; CO<sub>2</sub> concentration in bedrooms is usually excessive overnight and, regularly, indoor relative humidity remains too high; heat losses depend entirely on the physical condition of the constructive elements (walls, roofs, air leakage and glazing) which occupants cannot easily improve.

© 2020 Elsevier B.V. All rights reserved.

## 1. Introduction

Until recently, the improvement of the energy efficiency and indoor environmental quality (IEQ) of homes was only linked to economic and environmental issues. However, over the last decade there has been growing interest in the study of its relationship to health [1–4]. Energy retrofits usually have a favourable impact on residents' health, although some could worsen indoor air quality (IAQ), leading to adverse health effects [1].

According to a 2016 EEA report [5], on a local scale the effects of global climate change have resulted in a reduction in energy demand for space heating and an increase in demand for space cooling between 1951 and 2014. According to projections, temper-

atures in Europe will continue to increase, causing hotter and more frequent heat extremes, especially in the South, a trend which is likely to accelerate. Therefore, in southern Europe, the seasonal effect of hot summers on the energy use, energy performance (EP) and IEQ of buildings is a well-developed field of research, with many studies analysing buildings located in European Mediterranean cities under summer conditions [6–8]. In contrast, and with some exceptions [9,10], due to the overconfidence in the thermal capacities of building envelopes to maintain warmth indoors less attention has been paid to the impact of cold weather on buildings and their residents in the Mediterranean region, where the winters are mild. Nevertheless, as reported by Healy [11], “higher mortality rates are generally found in less severe, milder winter climates where, all else equal, there should be less potential for cold strain and cold related mortality. Housing standards have been linked as a potential, causative factor behind this paradox”. Healy named this phenomenon the “paradox of winter mortality”. According to further analysis by Fowler 2015 [12], Excess Winter Deaths Index (EWDI, which is the ratio of deaths in the winter period compared with deaths in the non-winter period) for Malta, Portugal, Spain, Cyprus, and Belgium was significantly higher in statistical terms than the average EWDI for the other 30 European countries. When studying the short-term effects of cold weather on mortality in 15

*Abbreviations:* AEMET, Spanish state meteorological agency.; Br, Bedroom.; CTE DB HE, Spanish energy code.; EP, energy performance; IRH, Indoor relative humidity (%); IEQ, Indoor environmental quality.; IAQ, Indoor air quality.; IAT, Indoor air temperature (°C); Lr, Living room.; NV, Natural ventilation.; NZEB, Nearly zero energy building.; n50, air change rate at 50 Pa (h<sup>-1</sup>); OAT, Outdoor air temperature (°C); ORH, Outdoor relative humidity (%); T<sub>opt</sub>, Optimal indoor operative temperature (°C); T<sub>o</sub>, Outdoor reference temperature (°C); TBB, Thermal bridge break.; U, Thermal transmittance (W/ m<sup>2</sup>K).

\* Corresponding author.

E-mail addresses: [rosanmar2@alum.us.es](mailto:rosanmar2@alum.us.es) (R. Caro), [jsendra@us.es](mailto:jsendra@us.es) (J.J. Sendra).



## Artículo 4

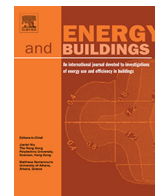
**The role of hybrid systems in the decarbonization of residential heritage buildings in Mediterranean climate. A case study in Seville, Spain.**

Caro, R.; Sendra, J.J. (2021)

Energy and Buildings 250, 111302, 1-19

DOI: [10.1016/j.enbuild.2021.111302](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111302)





# The role of hybrid systems in the decarbonization of residential heritage buildings in mediterranean climate. A case study in Seville, Spain



Rosana Caro <sup>a,\*</sup>, Juan José Sendra <sup>a,\*</sup>, Carmen María Muñoz González <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Spain

<sup>b</sup> Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Málaga. Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Universidad de Málaga, Spain

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 10 June 2021

Revised 7 July 2021

Accepted 20 July 2021

Available online 26 July 2021

### Keywords:

Heritage housing

Built heritage decarbonization

Energy retrofit

RES building integration

Hybrid energy system

Thermal comfort

## ABSTRACT

Residential heritage buildings in the Mediterranean region face unexpected challenges in the field of energy efficiency and indoor environmental quality to ensure the sustainable conservation of historic town centres. This paper evaluates whether the conservation of their values can coexist with the current energy efficiency requirements and be included in urban decarbonization plans to prevent neglect and degradation. For this, a comprehensive decarbonization plan was drawn up based on the results of a previous energy audit on the case study selected, an 18th-century listed residential building in Seville, Spain. Envelope improvement was combined with mechanical ventilation and an integrated heat pump combining RESs and electricity from the public grid to cover all thermal needs in order to reach NZEB performance in the building. Despite the complexity of integrating demanding energy efficiency standards into heritage buildings, which requires case-by-case analysis and dynamic simulation, findings show a notable degree of approximation to NZEB performance. The main obstacles stem from the large amount of energy consumed by auxiliary systems and the relatively low presence of RESs in the national electricity mix.

© 2021 Elsevier B.V. All rights reserved.

## 1. Introduction

Since 2012, energy efficiency requirements in building renovation have been mandatory for all EU buildings, except those listed for their heritage values [1]. There is now widespread consensus on the adverse effects that such an exception may entail, as it is thought that it could encourage abandonment and prevent ambitious EU decarbonization targets from being met [2]. In social terms it is also unfair to the population living in conservation areas, who are left more vulnerable to risks arising from energy

obsolescence and climate change, in contradiction with the heritage conservation principles proclaimed by UNESCO [3] and ICOMOS [4,5] under the new sustainability approach. In view of this, in the last decade this issue has become the focus of a significant number of EU-funded projects [6–10].

It is true that the energy retrofit of heritage buildings is a challenging multi-objective task, often described as a balancing procedure, which requires trade-offs between conflicting goals [11] of different types: conservation (preservation of the integrity of the constructive elements, the historic urban landscape and the archaeological remains); economy (cost-effectiveness and economic feasibility); environment (GHG emissions during the buildings' operational stage and impact of materials and processes during their whole life cycle); and health (thermal comfort and indoor air quality (IAQ)). The need to bring together all these targets has recently become an additional incentive for the standardization of the decision-making process [12,13]. One of the more complex tasks is that of cutting the levels of primary energy consumption of fossil fuel down to those set for non-listed buildings, something which necessarily involves the integration of renewable energy sources (RESs) in their energy supply, usually hindered by regional and/or local heritage conservation policies. Some of these

*Abbreviations:* ASHP, air-source heat pump; ASrHP, air-to-water reversible heat pump; DHW, domestic hot water; EWH, electric water heater; FE, final energy (kWh); GHG, greenhouse gases; HP, heat pump; IAT, indoor air temperature (°C); IAQ, indoor air quality; MVS, mechanical ventilation system; NEC, Spanish national energy code; NZEB, near-zero energy building; nrPE, non-renewable primary energy (kWh) n50: air change rate at 50 Pa ( $\text{h}^{-1}$ ); OAT, outdoor air temperature (°C); OHD, occupied hours of discomfort (h); PE, primary energy (kWh); PEF, primary energy factor (dimensionless); PEG, public electricity grid; PV, photovoltaics; RES, renewable energy sources; SPF, seasonal performance factor (dimensionless); TC, thermal comfort; U-value, thermal transmittance ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ).

\* Corresponding authors.

E-mail addresses: [rosacarmar2@alum.us.es](mailto:rosacarmar2@alum.us.es) (R. Caro), [jsendra@us.es](mailto:jsendra@us.es) (J.J. Sendra), [carmenmgonzalez@uma.es](mailto:carmenmgonzalez@uma.es) (C.M. Muñoz González).

**ANEXO**



## Relevancia científica de las revistas indexadas

Los cuatro artículos publicados hasta la fecha han sido publicados en las revistas *Energy and buildings*, *Sustainable Cities and Society* e *International Journal of Sustainable Development and Planning*. La información sobre factores de impacto y posición que ocupan en el ranking de su área se resumen en la siguiente tabla.

Información relativa a las revistas indexadas en las que se ha publicado

ISSN	Base de datos	Nombre	Categoría temática	Factor de impacto*	Ranking*	Número de artículos	Fecha de publicación
0378-7788	JCR	Energy and buildings	Engineering, Civil	5.879	Q1 (9/137)	2	2021
2210-6707	JCR	Sustainable Cities and Society	Construction & Building Technology	5.268	Q1 (5/63)	1	2019
1743-7601	SJR	International Journal of Sustainable Development and Planning	Geography, Planning and Development	0.221	Q3	1	2018

\* Datos correspondientes al año de publicación y al último factor de impacto publicado







**doctorado en arquitectura**  
escuela técnica superior de arquitectura  
instituto universitario de arquitectura  
y ciencias de la construcción

