

Evaluación de la eficiencia energética real obtenida transcurridos 15 años de un proceso de rehabilitación energética en un edificio de viviendas existente: caso en el Clot (Barcelona)

Evaluation of the actual energy efficiency obtained after 15 years of an energy rehabilitation process in an existing house building: case in “el Clot” (Barcelona)

Oriol Muntané Raich  UPC-ETSAV, St. Cugat del Valles (España).

Joan Ll. Zamora Mestre  UPC-ETSAV, St. Cugat del Valles (España).

Ignacio Costales Calvo  UPC-ETSAV, St. Cugat del Valles (España).

Autor de contacto: oriol.muntane@upc.edu

RESUMEN

Tras más dos décadas transcurridas desde las primeras rehabilitaciones realizadas en edificios reales con miras a mejorar su eficiencia energética, resulta ya imprescindible recopilar y analizar los datos que estas experiencias aportan para poder aprender de ellas y abordar con mayor conocimiento de causa las próximas intervenciones de rehabilitación energética. El presente artículo analiza el consumo energético real, de un periodo de 10 años, de un edificio rehabilitado durante los años 2007 -2008. Pasados más de 15 años de su rehabilitación se revisa cuáles han sido los consumos energéticos reales, a y qué aprendizajes se pueden aplicar a las nuevas rehabilitaciones. Con los datos reales de consumo energético acumulados durante estos años se advierten ya algunos aspectos relevantes que inciden en la eficiencia energética del edificio y que los modelos de simulación aún no incorporan. Los datos suministrados por los contadores de energía se contrastan con fuentes reconocidas y se comparan con la previsión de consumos de la certificación energética, demostrando diferencias sustanciales entre estos valores y la realidad. También se aprecian otros fenómenos que habrá que tener en cuenta en el futuro inmediato.

Palabras clave: eficiencia energética; rehabilitación energética; post-occupancy evaluation; rehabilitación sistemas activos.

ABSTRACT

After more than two decades since the first energy efficiency rehabilitation projects were carried out on real buildings, it has become essential to collect and analyses the data provided by these experiences in order to learn from them and approach future energy rehabilitation interventions with greater knowledge. This article analyse the actual energy consumption over a 10-year period of a building that was rehabilitated during 2007–2008. More than 15 years after its rehabilitation, the study reviews the building’s real energy consumption and explores which lessons can be applied to future projects. The actual energy consumption data accumulated over these years already reveal certain relevant factors that affect the building’s energy efficiency—factors that are still not captured by simulation models. The data provided by energy meters are compared with recognized sources and contrasted with the predicted consumption from the energy certification, showing substantial differences between these estimates and the real figures. Other phenomena are also observed that should be taken into account in the near future.

Keywords: Energy efficiency; Energy rehabilitation; Post-occupancy evaluation; Rehabilitation of active systems.

Cómo citar este artículo/Citation: Oriol Muntané Raich, Joan Ll. Zamora Mestre, Ignacio Costales Calvo (2025). Evaluación de la eficiencia energética real obtenida transcurridos 15 años de un proceso de rehabilitación energética en un edificio de viviendas existente: caso en el Clot (Barcelona). Informes de la Construcción, 77 (578): 7108. <https://doi.org/10.3989/ic.7108>

Copyright: © 2025 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0)

Recibido/Received: 04/09/2024
Aceptado/Accepted: 26/05/2025
Publicado on-line/Published on-line: 01/10/2025

1. ANTECEDENTES

La DIRECTIVA 2010/31/UE de 19 de mayo de 2010, en las consideraciones previas (punto 3), hace referencia a que “el 40% del consumo total de energía en la Unión Europea corresponde a los edificios” [1] e insta a los países miembros de la UE a una renovación en profundidad del parque inmobiliario existente, en el que los edificios de viviendas son mayoritarios. En la recién aprobada DIRECTIVA (UE) 2023/1791 [2], en las consideraciones previas (punto 13), insiste: “Aunque el potencial de ahorro de energía sigue siendo elevado en todos los sectores, existe un reto particular (...) y con los edificios, pues el 75 % del parque inmobiliario de la Unión Europea tiene un bajo rendimiento energético.” (Punto 42): “Los edificios son responsables de entorno al 40 % del consumo total de energía de la Unión y del 36 % de las emisiones de GEI de la Unión procedentes de la energía.”

A nivel del Estado Español, el informe “Estrategias para la rehabilitación”[3] expone un incremento de beneficios para el sector de la construcción y una de las claves para transformar el propio sector de la edificación. En el mismo sentido Ludevid J. [4] resalta la importancia de la rehabilitación energética para el cumplimiento de las Directivas Comunitarias, así como para la mejora del confort de los usuarios. Además, el fomento de la rehabilitación energética aporta otros beneficios asociados como una disminución en el consumo de agua y materiales, así como una limitación del impacto ocasionado por la ocupación de nuevo suelo [5].

Así pues, desde hace dos décadas, la rehabilitación energética del parque inmobiliario es un reto prioritario, tanto a nivel europeo como a nivel de nuestro país.

Según la publicación Observatorio de Vivienda y Suelo, Boletín núm. 47 [6] del tercer trimestre 2023, en la tabla 4.2 “Visados de dirección de obra según información de los COAT (número de viviendas)”, el porcentaje de proyectos visados para reforma y ampliación de viviendas está situado entre el 18,4 y el 20,00% del total de visados. En la tabla 4.1 de la misma publicación, “número de viviendas según información de licencias: nueva planta y rehabilitación” el mismo grupo en el año 2019 estaba situado entre el 12,4 y el 8,6%. En esta publicación no se especifica si estos proyectos visados lo fueron para obras de consolidación o bien específicamente para la mejora de la eficiencia energética. De todos modos, estas cifras distan aún de lo que debería ser una actividad rehabilitadora suficiente para reducir el consumo energético de los edificios existentes y acercarlo a los parámetros horizonte antes mencionados.

Por último, la publicación del ICAEN: “Edificios de consum d’energia gairebé zero” [7] estima que el 75% de los edificios actualmente existentes en la UE son energéticamente ineficientes y del total de éstos el 85-95% aún se seguirán utilizando en el año 2050. El porcentaje estimado actualmente de rehabilitaciones energéticas anuales es del 1%.

Para aumentar en toda la UE este porcentaje de edificios rehabilitados energéticamente la Comisión Europea impulsó la estrategia “Renovation Wave” [8], el objetivo de la cual es simultáneamente mejorar la eficiencia energética, impulsar la economía y mejorar la calidad de vida de los europeos.

En este mismo sentido es remarcable el documento ERESEE (Estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España) [9], en el que se pueden encontrar algunos ejemplos de proyectos de rehabilitación energética, con descripciones detalladas de las diferentes soluciones aplicadas, pero en el que no se incluyen datos reales de los resultados obtenidos al cabo de los años por esas soluciones pioneras: ¿han logrado los objetivos previstos? ¿realmente se consiguieron las mejoras energéticas esperadas? ¿los consumos son los esperados? [10].

En el transcurso de una obra de rehabilitación y su posterior explotación, pueden aparecer factores imprevistos, como que finalmente la obra realmente ejecutada sea diferente a la prevista en el proyecto [11] o pautas de comportamiento de los usuarios distantes a las simuladas [12], [13], [14], [15]. Este artículo pretende incidir en la necesaria verificación del éxito de la rehabilitación energética.

La Directiva 2018/844 [16] establece las bases para evaluar el rendimiento energético de los edificios una vez rehabilitados. Pese a la experiencia adquirida y pese a la metodología de la Directiva antes citada, a menudo se constata que los edificios rehabilitados energéticamente no funcionan tal como se había previsto durante la fase de proyecto y obra, generando dudas y contradicciones respecto de la efectividad de la rehabilitación [17].

El procedimiento denominado “Post Occupancy Evaluation” (POE), permite analizar el comportamiento energético real de un edificio y a partir de ello evaluar el grado de éxito de la intervención realizada con respecto a las premisas adoptadas durante la fase de proyecto y ejecución de la obra. Para que este análisis del POE sea aun de mayor utilidad, sería necesario unificar los criterios con respecto a las distintas variables a comparar, para así generar un conocimiento compartido que permita aportar soluciones contrastadas y potenciar el éxito de las rehabilitaciones futuras [18]. A nivel del Estado Español, han sido de referencia los estudios de monitorización y seguimiento energético realizados en la Comunidad de Madrid [19], [20].

A continuación, se citan las fuentes oficiales disponibles sobre consumos energéticos en la edificación a nivel autonómico y estatal consultadas:

- OBSERVATORI DE L'ESTAT ENERGÈTIC D'EDIFICIS DE CATALUNYA ICAEN [21]: Pag 31 Icaen consum mitjà habitatge 80 m².
- ESTRATEGIA A LARGO PLAZO PARA LA REHABILITACIÓN ENERGÉTICA EN EL SECTOR DE LA EDIFICACIÓN EN ESPAÑA. [9] Pag 40.
- PROYECTO SECH-SPAHOUSEC, ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO DEL SECTOR RESIDENCIAL EN ESPAÑA, IDAE [22].
- ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO RESIDENCIAL PARA CALEFACCIÓN EN ESPAÑA [23].

2. INTRODUCCIÓN

Pocas veces el proyectista tiene la posibilidad de tener un feedback adecuadamente documentado del funcionamiento energético real del edificio que ha proyectado y del cual ha dirigido las obras. Cuando las obras terminan y entran los ocupantes, el técnico habitualmente se desvincula del edificio entregado. Pero en cambio es en este momento en el que se debería iniciar el proceso de comprobación y evaluación del grado de acierto de las decisiones tomadas durante todo el proceso de proyecto y obra. En este trabajo, se describen las intervenciones realizadas en la rehabilitación energética de un edificio de viviendas existente en el barrio del Clot de la ciudad de Barcelona y se presenta en paralelo un análisis del consumo energético del edificio.

2.1. Emplazamiento

El edificio está situado en la ciudad de Barcelona, en el barrio de El Clot. La ordenación urbana preponderante en este barrio es de edificios alineados a vial y dispuestos entre medianeras, que configuran manzanas cerradas y calles corredor que configuran una morfología urbana propia de ciudad compacta. La calle tiene un ancho de 9 metros y el espacio interior libre de la manzana es aproximadamente de 20 x 25 metros. El clima en la ciudad de Barcelona es de tipo mediterráneo, con veranos calurosos y alta humedad, e inviernos suaves y secos. Las lluvias se concentran en los equinoccios.

2.2. Programa

El edificio tiene planta baja, planta entresuelo y dos plantas piso. Las dos viviendas de planta baja (que también ocupan la planta entresuelo) tienen acceso directo desde la calle. Las plantas piso tienen un acceso propio a través del núcleo de escalera y presentan dos viviendas por rellano. En total son 6 viviendas.

El programa funcional de estas viviendas es:

- A. Viviendas en planta baja y entresuelo. Planta inferior: salón comedor y cocina. Planta entresuelo: dormitorio principal (2 personas), un dormitorio individual (1 persona), un estudio y baño. La superficie útil interior total de cada una de ellas es de 83,9 m²
- B. Viviendas en cada una de las dos plantas piso: salón comedor y cocina, dormitorio principal (2 personas), dormitorio individual (1 persona) y un baño. La superficie útil interior total es de 52,11 m².

El total de la superficie útil del edificio es de 376,24 m².

3. SOLUCIONES TÉCNICAS

3.1. Proyecto piloto

El edificio que aquí se presenta fue objeto de una rehabilitación en profundidad durante los años 2007 y 2008. Esta obra fue uno de los proyectos piloto para la implantación del sistema de control de calidad (CC) para rehabilitaciones energéticas, denominado con el acrónimo SQUARE [24] "A System for Quality Assurance when Retrofitting Existing Buildings to Energy-Efficient Buildings". SQUARE fue un proyecto cofinanciado por la Comisión Europea, con el soporte del programa Intelligent Energy Europe (IEE), con inicio en noviembre de 2007 y finalización en abril de 2010 [25], [26].

Las etapas definidas en el proyecto CC-SQUARE, abarcaban desde el establecimiento de la fase previa de requerimientos, hasta la definición de los objetivos que se pretendía conseguir en la rehabilitación, de forma que posteriormente se pudiera evaluar el grado de éxito conseguido con respecto de la situación inicial.

3.2. Objetivos de la rehabilitación

Los sistemas del edificio sobre los que se intervino fueron:

- A. Sistema estructural
- B. Sistemas de acondicionamiento pasivo
- C. Sistemas de acondicionamiento activo
- D. Sistema de saneamiento: ciclo del agua

No se contempló en su momento la instalación de sistemas de producción de energía renovable, puesto que el edificio adyacente provocaba sombras al edificio en rehabilitación durante gran parte del día.

3.3. Soluciones técnicas adoptadas

Para describir las soluciones técnicas adoptadas, estas se ordenan por sistemas, enumerando cada subsistema según fuera la operación.

A. SISTEMA ESTRUCTURAL

Forjados: con el fin de mantener los techos existentes de vigas de madera, éstos se reforzaron por la cara superior con una capa de compresión de hormigón vertido in situ, solidaria con el techo existente mediante conectores de metal anclados a las vigas de madera, transformando así el techo existente en una solución de sección tipo T, mixto hormigón-madera, de mayor canto y mayor inercia que la original.

Viguetas: para sustituir las vigas originales de madera que no ofrecían suficientes garantías por su envejecimiento, se utilizaron vigas de madera tipo FJI (vigas formadas por alas de Kerto-S y una alma de tablero OSB). En los techos de la planta baja y del entresuelo se utilizaron unas viguetas de madera laminada para poder reducir el canto.



Figura 1. Fotos de la fachada en su situación inicial y final. Fuente: autores

B. SISTEMAS PASIVOS

Los distintos cerramientos de las viviendas se aislaron térmicamente. Las soluciones constructivas aplicadas fueron:

- Fachada a la calle: el muro existente era de fábrica mixta piedra-cerámica de 40 cm de espesor y se aisló por el exterior con un sistema SATE de la firma STO. Este sistema se dobló en jambas y dinteles con la finalidad de disminuir el impacto del puente térmico. Los gruesos de la capa de aislamiento térmico aplicada fueron de 6 cm en fachada y 2 cm en jambas y dinteles (Figura 1) Esta solución permitía mantener la masa del muro en contacto directo con el interior, lo que proporciona una mayor inercia térmica colaborante a la estabilización del clima interior, tanto en verano como en invierno [20].
- Fachada posterior: el muro existente era de obra de fábrica cerámica de 15 cm de espesor; se trasdosó por el interior con 7 cm de lana de roca y un acabado de placa PYL.

- Medianeras y divisorias en contacto con los espacios comunes del edificio: los muros de obra de fábrica cerámica eran de 15 cm de espesor y se trasdosaron con una capa de 4 cm de lana de roca y un acabado de placa PYL.
- Cubierta: Se dispuso una capa de aislamiento térmico formada por 10 cm de espesor de lana de roca situada entre las nuevas vigas FJI, justo por encima de una capa de barrera de vapor. El acabado superior es una tarima de tablas de madera machihembradas con una cámara de aire ventilada que mejora las condiciones de sobrecalentamiento por radiación solar en verano.
- Solera: La nueva solera está formada por una capa de 10 cm de grava, una lámina de polietileno, una capa aislante térmica de placas de XPS de 6 cm y una losa de hormigón armado de 10 cm de espesor.
- Huecos: se sustituyeron todas las carpinterías exteriores por unas nuevas de madera con estanqueidad al aire clase 3 y acristaladas con vidrio de cámara de aire (4-12-6 mm, vidrio interior, cámara de aire y vidrio exterior). Las juntas del conjunto carpintería-premarco-placa PYL se sellaron con bandas autoadhesivas estancas al aire.

Tabla 1. Transmitancias de la envolvente térmica antes y después de la rehabilitación y las exigencias del CTE del momento y actuales. Fuente: autores

	Previas a la rehabilitación (W/m ² K)	Posterior a la rehabilitación (W/m ² K)	s/ CTE HE ² 2008 ¹ (W/m ² K)	s/ CTE HE ² actual ² (W/m ² K)	Permeabilidad al aire (m ³ /hm ²)
Fachada a calle	1,70	0,73	0,95	0,49	
Fachada posterior	1,70	0,48	0,95	0,49	
Muro escalera	1,70	0,7	1	0,7	
Medianería PP	1,70	0,7	1	0,7	
Medianería PB	2,72	0,7	1	0,7	
Cubierta azotea	2,00	0,31	0,53	0,40	
Solera	2,70	0,43	0,65	0,49	
Huecos	4,20	3,1	4,4	2,10	<=9

Las soluciones descritas permitieron mejorar la transmitancia térmica (ver Tabla 01) de todos los cerramientos hasta alcanzar valores mejores que los mínimos exigidos por la normativa de aplicación en viviendas nuevas en el momento de ejecución de la obra (CTE HE2 2008).

C. SISTEMAS ACTIVOS

Subsistema de calefacción y ACS: se instaló un sistema comunitario de producción de calor para las 6 viviendas, formado por una caldera de condensación a gas de alto rendimiento, de 50 kW de potencia (Marca WOLF, modelo CGB 50), y un acumulador de inercia de 500 litros. Desde dicho acumulador salen dos ramales (uno para las viviendas de las puertas primeras y otra para las viviendas de las puertas segundas) que distribuyen el ACS en un circuito cerrado. Antes de la entrada de cada vivienda hay un contador de energía térmica (marca Kamstrup, modelo MULTICAL 401) que mide la energía térmica consumida por cada vivienda, tanto para uso de calefacción como de ACS. Este sistema de contadores permite dividir la factura comunitaria del combustible de gas de forma equitativa, según el consumo de cada vivienda.

Subsistema de ventilación: para alcanzar un ambiente interior saludable, cada una de las viviendas dispone de un sistema propio de ventilación mecánica con doble flujo y recuperador de calor (modelo KOMPAKTRECU 1600 HRE). El dimensionado de la instalación se hizo según los caudales definidos en el documento DB-HS³ en vigor en el momento de la ejecución de la obra.

D. SISTEMA DE SANEAMIENTO

Recuperación del agua de lluvia: la red de saneamiento del edificio es separativa. Con la finalidad de ahorrar agua, el edificio dispone de un sistema propio de recogida y almacenamiento del agua de lluvia, la cual se destina al riego de los jardines de los patios de las viviendas de la planta baja (Figura 2).

¹ https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DBAnteriores/DBHE_200801.pdf

² <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DBHE.pdf>

³ https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HS/DBAnteriores/DBHS_200801.pdf



Figura 2. sistema de recogida y almacenamiento del agua de lluvia. Fuente: autores

4. FUENTES DE DATOS PARA EL ANÁLISIS ENERGÉTICO

Este estudio se ha podido realizar gracias a la cesión por parte de los propietarios de los datos acumulados de consumo energético. Así pues, no se trata de una investigación programada previamente con una selección de las variables a analizar, sino que se parte exclusivamente de los datos utilizados por la Comunidad de Vecinos para facturar equitativamente el consumo de gas. En consecuencia, el orden y frecuencia de los registros de consumo son las realizadas por los mismos propietarios, en un primer periodo, y posteriormente por el administrador de la finca. Con la finalidad de verificar y complementar esta fuente de datos se procedió a realizar encuestas y entrevistas a los propietarios.

4.1. Metodología

La metodología de análisis de los datos disponibles ha seguido los siguientes pasos:

- Primero, a partir de los datos de consumos, se analiza cuáles son los posibles periodos que pueden resultar más significativos para este estudio. Sobre estos datos se comparan los resultados y se detectan las posibles anomalías (ver tabla 02).
- Segundo, se comparan los resultados obtenidos con fuentes oficiales de consumo energético en la edificación residencial y con datos meteorológicos de los periodos evaluados. Los primeros sitúan el caso de estudio en el parámetro del consumo medio de la edificación en el correspondiente sector geográfico. Los segundos permiten evaluar en el caso de estudio la influencia directa que tiene la temperatura ambiente en el consumo de calefacción.
- Tercero, con la finalidad de determinar el impacto medioambiental, se han transformado los consumos registrados en emisiones equivalentes de CO_2 . Estos valores obtenidos se comparan con los definidos en el Certificado Energético más comúnmente utilizado en Cataluña (el 93,8% de los certificados emitidos se han realizado con el programa oficial CE3X)⁴.
- Cuarto, las encuestas y entrevistas han sido de gran utilidad para saber con exactitud el número de habitantes por vivienda y para comprender las pautas de comportamiento y grado de satisfacción de los usuarios con la finalidad de esclarecer algunos datos de consumo inesperados.

4.2. Datos de consumo de energía

Tal y como se ha descrito, el consumo de energía térmica del sistema de calefacción y ACS comunitario se registra para cada vivienda en contadores individuales de energía situados en cada una de ellas.

De este modo, desde la puesta en funcionamiento de la nueva instalación (2010) hasta la fecha se han registrado separadamente los consumos de energía con la finalidad de poder dividir los gastos correspondientes de forma proporcionada. En un primer periodo (2010-2013) los datos

⁴ https://icaen.gencat.cat/ca/energia/usos_energia/edificis/certificacio/observatori-de-la-certificacio-deficiencia-energetica-dedificis/index.html

fueron registrados por los mismos propietarios en una sencilla hoja de cálculo compartida. Posteriormente la gestión de dicho proceso pasó a manos de un administrador de fincas que realizó anotaciones más discontinuas.

En la tabla 02 se puede ver, marcados con una X aquellos periodos de los que se dispone de lecturas de los contadores de energía y los cuales podrán ser analizados. En esta misma tabla 02 se muestran rodeados en color rojo los periodos de consumo de energía analizados y en color azul los periodos no analizados, bien por ser repetitivos o poco significativos. En total se han seleccionado 10 periodos de contabilización de consumos. En color negro se muestran los periodos que corresponden a verano y que sirven para evaluar el consumo de ACS, puesto que no hay consumo de calefacción en verano. Las casillas sombreadas de color verde corresponden a los meses en que la población del edificio vivió confinada por las restricciones derivadas del COVID-19. Por último, las X rotuladas de color verde corresponden a los periodos cuyos datos han sido utilizados para analizar la evolución del consumo a lo largo de la vida útil del edificio (ver figura 4).

Tabla 2. periodos analizados. Fuente: autores

	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	
2010												x	periodos analizados
2011	x		x	x		x				x	x	x	
2012	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	periodos posibles
2013	x	x	x	x	x	x	x	x					
2014			x	x	x	x	x	x					
2015													
2016										x	x		periodos sólo ACS
2017						x			x				
2018											x		confinamiento
2019										x			
2020		x			x	x	x	x	x		x	x	fechas de evolución
2021		x	x		x	x	x	x			x		
2022		x										x	

4.3. Encuesta

La encuesta permite aportar información relevante sobre los habitantes del inmueble. Los datos que ha aportado son:

- Nivel de ocupación durante el periodo analizado de la vida útil del edificio, desde la primera ocupación tras la rehabilitación hasta la fecha actual del edificio (ver tabla 04).
- Conocimiento que tienen los ocupantes del funcionamiento de los sistemas de climatización (calefacción, agua caliente y ventilación). Se les preguntaba por la temperatura interior de la vivienda, por el uso del recuperador de calor y por el consumo medio de la vivienda.
- El esfuerzo económico personal y la percepción del coste de la energía necesaria para mantener las viviendas en condiciones de confort.
- El grado de satisfacción con la vivienda y posibles mejoras que habían implementado (ventiladores, aire acondicionado...) o creían que sería interesante implementar.

4.4. Entrevistas

Las entrevistas han tenido lugar de forma esporádica al realizar las encuestas a los habitantes del inmueble. Estas han servido para complementar bien las informaciones de las encuestas o bien aspectos que no hacían referencia a la encuesta y se consideran relevantes.

5. RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados que se describen a continuación son el producto de las tres fuentes anteriormente descritas: datos, encuestas y entrevistas.

5.1. Análisis de los periodos anuales de consumo de ACS y calefacción

De todos los valores proporcionados se pudieron seleccionar 10 periodos anuales de consumos. Estos son todos de un año entero, menos el periodo 12/20 – 12/22, en el que se recogen dos años y se divide por 2. El resumen de consumos por periodo y vivienda se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Consumos de energía anuales de calefacción y ACS [kWh-año]. Fuente: autores

Vivienda	12/10	12/11	08/12	04/12	08/13	10/15	11/17	11/20	05/20	(12/20
	- 12/11	- 12/12	- 08/13	- 04/13	- 08/14	- 10/16	- 11/18	- 11/21	- 05/21	- 12/22) 2
B 1^a	2.837	2.729	2.174	2.058	1.818	1.531	1.762	2.048	1.844	1.906
B 2^a	3.158	3.867	2.629	2.564	2.597	2.224	2.197	3.965	3.718	2.649
1 1^a	974	2.091	2.386	2.422	1.260	1.132	1.199	1.667	1.404	1.170
1 2^a	1.229	1.963	1.164	1.107	888	817	0	1.063	964	1.181
2 1^a	1.396	1.408	1.363	1.298	984	1.030	2.512	1.981	1.783	2.349
2 2^a	2.342	929	612	595	2.442	2.220	2.673	2.458	2.385	2.422
TOTAL	11.936	12.987	10.328	10.044	9.989	8.954	10.343	13.182	12.098	11.676

De dicha tabla se puede deducir que los valores del consumo medio de calefacción y ACS son:

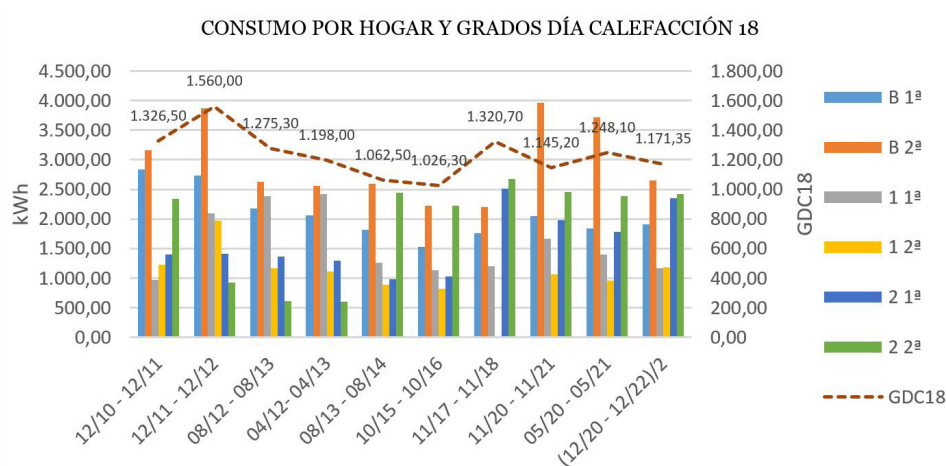
- El consumo medio anual del conjunto del edificio es de: 11.153,70 kWh
- El consumo medio anual por vivienda es de: 1.858,95 kWh/vivienda
- El consumo medio anual por m² es de 29,05 kWh/m²

Para contrastar estos valores de consumos medios con una referencia válida, se consultaron los resultados del “Proyecto SECH-SPAHOUSEC” del IDAE [22]. En dicho proyecto se establecen los valores del consumo anual de calefacción y ACS de las viviendas en bloque plurifamiliar, en la zona mediterránea en:

- Calef.: 4,9 GJ (1.638,90 kWh) / vivienda
- ACS: 5,9 GJ (1.361,12 kWh) / vivienda
- Total: 10,8 GJ (3.000,02 kWh) / vivienda

Así pues, los valores del estudio del bloque analizado respecto al proyecto citado del IDAE, supondrían un ahorro conjunto de energía térmica aplicada a calefacción y ACS del 38% con respecto a una vivienda media en un bloque plurifamiliar de la zona mediterránea.

La Figura 3 muestra los consumos individualizados para las 6 viviendas, en cada uno de los periodos considerados. Sorprende inicialmente el valor del consumo de la vivienda B2^a por la diferencia notable respecto al valor del consumo de la B1^a, pues ambas tienen la misma superficie útil. A través de las encuestas se apercibió que los usuarios de la vivienda B1^a eran los únicos que utilizaban el recuperador de calor, tanto en verano (con el bypass para freecooling) como en invierno, para así reducir el consumo de calefacción y mantener un ambiente saludable.

**Figura 3.** consumos de energía por unidad de vivienda y total por periodo. Fuente: autores

Cabría esperar también que las viviendas situadas bajo la azotea (viviendas 2^o1^a y 2^o2^a), las cuales tienen una mayor superficie de cerramientos en contacto con el aire exterior, tuvieran unos consumos energéticos superiores a los de las viviendas de la planta inmediatamente inferior (1^o1^o y 1^o2^a), ya que ambas tienen la misma superficie útil interior. Esto es así a partir del periodo 08/13-08/14, pero no en los periodos anteriores. Esta diferencia podría deberse al distinto número de ocupantes que habitan en cada vivienda, aspecto que incide en el consumo de combustible destinado

a la producción de ACS; según datos del “Proyecto SECH-SPAHOUSEC” de IDAE, la calefacción es responsable del 45,37% del consumo energético térmico y el ACS del 54,63% respectivamente.

Según el cuadro de ocupación del inmueble (Tabla 04), elaborado a partir de las encuestas, se puede observar que el número de habitantes de los pisos 1^o1^a y 1^o2^a, es siempre superior que el de las viviendas 2^o1^a y 2^o2^a. Esto justificaría que los consumos energéticos de los pisos de las plantas primeras fueran inicialmente superiores y que se aproximaran a partir del periodo 08/13-8/14, momento en que las dos viviendas de las plantas superiores ya son ocupadas definitivamente, puesto que hasta ese momento no estaban habitadas de forma continuada.

Para contrastar estos valores agregados de consumo energético con la variante climática, se sumaron los valores grados-día de calefacción (GDC 18)⁵ de cada uno de los períodos considerados (línea discontinua del Gráfico 01). Esta línea tiene dos picos, uno en el periodo 12/11-12/12 y otro en el periodo 11/17-11/18. Sería de suponer una proporcionalidad en el consumo de las viviendas correlacionada con ambos picos. Pero sorprende que en el primer pico frío los máximos consumos corresponden a las plantas bajas; en cambio en el segundo pico frío son las viviendas de la planta segunda las que consumen mayor energía, siendo por contra las viviendas de la planta baja las que han aumentado el número de habitantes en dicho periodo (Tabla 4).

Tabla 4. Ocupación de habitantes por vivienda a lo largo del periodo de estudio considerado. Fuente: autores

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
B1a	2	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
B2a	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1
1o 1a	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4
1o 2a	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2
2o 1a	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1
2o 2a	0	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
total	9	12	14	14	14	15	17	16	14	14	14	14	14

5.2. Análisis de evolución del consumo y de las emisiones asociadas de CO₂

Para complementar el análisis inicial se elaboró una nueva gráfica con la evolución del consumo energético acumulado desde la primera ocupación hasta la actualidad. Para dicho análisis de la evolución del consumo acumulado, del edificio en general y de cada vivienda en particular, se trazó un recorrido temporal según los datos de los que se disponía desde el año 2010 hasta el 2022 (véase las X marcadas en color verde de la Tabla 02).

La figura 4 representa esta evolución y muestra unos resultados en concordancia con los esperados: las viviendas que más han consumido a lo largo del tiempo han sido las viviendas de la planta baja y de las plantas segundas, puesto que son las de mayor superficie o las que tienen mayor contacto con el ambiente exterior respectivamente. Las viviendas que menos han consumido han sido las de la planta primera, puesto que están limitadas entre otras viviendas y presentan una menor superficie de cerramiento en contacto con el ambiente exterior. Otra explicación a la diferencia de consumos energéticos entre las plantas primeras y segundas, podría deberse a las circunstancias de las medianeras con las fincas colindantes. Las plantas primeras lindan con un edificio de nueva planta mientras que las plantas segundas lindan con un edificio de rentas muy bajas y sin sistema de calefacción. En las viviendas del caso de estudio, la superficie del cerramiento de medianera era superior a la suma de los cerramientos de las fachadas. Así pues, si la finca vecina se mantiene a una temperatura de confort, la medianera se puede considerar un cerramiento adiabático, mientras que, si entre ambas viviendas hay una diferencia importante de temperatura, la medianera puede ser una fuente apreciable de pérdidas de calor, resultando entes casos las viviendas de las plantas segundas perjudicadas por este efecto.

Hasta la última fecha analizada, la vivienda que más energía había consumido era la B2^a y las que menos las dos viviendas de la planta primera. De todos modos, se puede apreciar también como, en la banda alta de los valores de consumo, se percibe que el uso racional de los sistemas de ahorro implementados (termostatos y recuperador de calor) parece que, si han favorecido a la vivienda B1^a, aún con mayor número de personas alojadas y mayor superficie útil interior que su vecina 22^a, ha consumido considerablemente menos.

⁵ Datos de www.meteo.cat estación Barcelona-Zoo coordenadas X UTM (m) 432152, Y UTM (m) 4582307

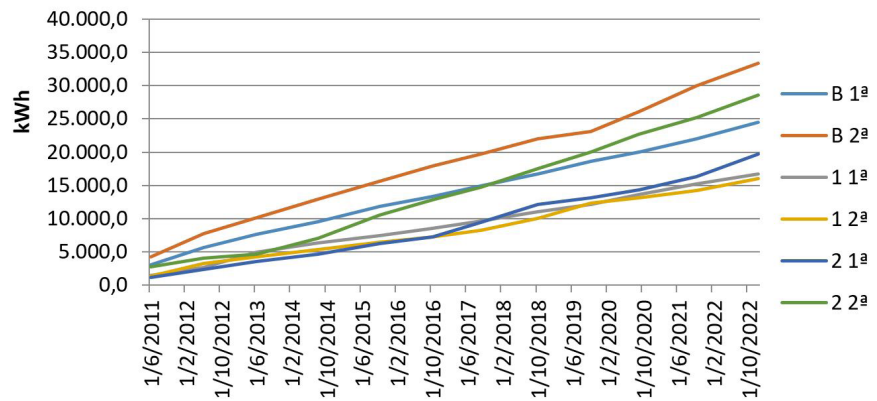


Figura 4. Evolución de los consumos por vivienda. Fuente: autores

Para tener una estimación de la potencial reducción de emisiones de CO₂ asociadas, se comparó con las emisiones asociadas según la certificación energética. El certificado de eficiencia energética (CEE) muestra el nivel de eficiencia energética de una vivienda de acuerdo con la demanda de energía, expresada en kWh/m²·año. Para obtener este dato del edificio del caso de estudio, se calculó el consumo medio diario de todo el periodo considerado para el estudio, obteniendo un valor del consumo medio diario a lo largo de toda la vida útil del edificio; dicho valor se divide por los m² útiles y se aplica a un periodo de un año (Tabla 5).

Tabla 5. Consumo medio de cada vivienda por m² y año. Periodo 2011-2022. Fuente: autores

Vivienda	ACS + Calefacción kWh/m ² por año
B 1ª	22,17
B 2ª	30,19
1 1ª	25,76
1 2ª	24,40
2 1ª	30,87
2 2ª	42,99

Estos resultados del caso de estudio se comparan con los obtenidos a través del Certificado de Eficiencia Energética (CEE) elaborado con el programario CE3X en dos supuestos: el primero, según la ocupación máxima teórica (tres personas por vivienda, total 18 habitantes en todo el inmueble) y la segunda con la ocupación real mínima según los datos obtenidos en las encuestas (9 habitantes en todo el inmueble). Lógicamente la demanda de calefacción en ambos casos debe ser la misma y únicamente debiera cambiar la demanda energética atribuida a la ACS. El CEE, considerado con 18 ocupantes, es el certificado que se acreditó en su día ante el ICAEN y que obtuvo una calificación energética B. La Tabla 06 siguiente relaciona el valor del consumo real con el valor de las demandas teóricas según el CEE modificado y considerando únicamente los 9 habitantes reales.

Los datos recopilados en la tabla 06 permiten obtener la reducción de emisiones de CO₂ [27] . El factor de paso de energía final a emisiones de CO₂, para gas natural, definido por el IDAE, es de 0,252 Kg CO₂/kWh. Así pues, la reducción de emisiones de CO₂ es de 2.154,79 kg año, comparando el consumo real con respecto a la demanda estimada por el CEE que contempla únicamente 9 personas viviendo en el inmueble. Si dicha comparación se realiza con respecto al CEE elaborado a partir de la densidad de personas nominal (CEE registrado en el ICAEN), la diferencia en emisiones asciende hasta 3.465,10 kg de CO₂ por año.

Tabla 6. Valores del consumo real comparado con el valor de las demandas teóricas según el CEE modificado y considerando únicamente los 9 habitantes reales. Fuente: autores

CEE_9hab	Superficie útil m ²	Real ACS + Calefacción kWh/m ² · año	CEE_9habACS*+ Calefacción kWh/m ² · año	Emisiones reales Kg CO ₂ /m ²	Emisiones CEE_9hab Kg CO ₂ /m ²	Emisiones reales edificio Kg CO ₂	Emisiones CEE_9hab edificio Kg CO ₂	Reducción de emisiones, Kg CO ₂ año
B 1ª	83,90	22,17	51,58	5,59	13,00	468,68	1090,55	
B 2ª	83,90	30,19	51,58	7,61	13,00	638,36	1090,55	
1 1ª	52,11	25,76	51,58	6,49	13,00	338,28	677,33	
1 2ª	52,11	24,40	51,58	6,15	13,00	320,43	677,33	
2 1ª	52,11	30,87	51,58	7,78	13,00	405,40	677,33	
2 2ª	52,11	42,99	51,58	10,83	13,00	564,48	677,33	
Total						2.735,64	4.890,43	2.154,79

5.3. Análisis del consumo energético para agua caliente sanitaria (ACS)

Puesto que el contador de energía implementado no discrimina entre energía térmica para ACS o para calefacción, la determinación del consumo de agua caliente sanitaria se ha llevado a cabo tomando únicamente los periodos estivales, en los cuales el consumo de calefacción es nulo [20] (véase círculos negros de la Tabla 02). Para definir con mayor precisión los intervalos de tiempo considerados “estival” se ha revisado previamente que los grados de calor-día en dichos intervalos fueran nulos.

Dado que se conocen con detalle las personas que habitan habitualmente en el inmueble, se recalcula periodo a periodo y según los habitantes del edificio en los meses que incumbe (ver Tabla 04: Ocupación del inmueble según los años) y se compara dicha ocupación con los consumos reales en el mismo periodo.

Para determinar la demanda energética teórica para ACS, ésta se calcula según se describe en los Anejos F y G del documento básico del CTE DB-HE, considerando el valor de la temperatura del agua de red definido en la Tabla A del Anejo G: “Temperatura diaria media mensual del agua fría (°C)”⁶ y según la Fórmula (1):

$$E = n^{\circ}\text{días} \cdot l/\text{persona} \cdot \text{día} (T_{\text{agua } 60^{\circ}} - T_{\text{aguared}}) \cdot 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ [kWh]} \quad (1)$$

Con la finalidad de obtener valores comparables, se define la demanda teórica en el mismo periodo y se divide por el número de días, obteniendo así el valor medio de los kWh/día de consumo energético para la producción de ACS en ese intervalo de tiempo. Lo mismo se hace con el consumo real obtenido a partir de los datos de los contadores de energía por vivienda en el edificio caso de estudio. Estos datos se muestran agrupados en el Figura 5.

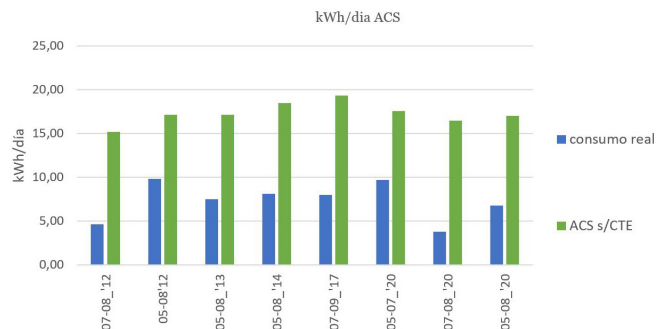


Figura 5. energía kWh/día para producción ACS. Fuente: autores

La diferencia entre el valor del consumo real que recoge el contador y el valor del consumo obtenido por el cálculo de la demanda teórica, está entre 1,75 veces (periodo 05-08 del 2012) y 4,33 veces superior (periodo 07-08 del 2020). Esta diferencia puede ser debida a que en los periodos de verano la población utiliza menos el agua caliente sanitaria para la higiene personal y que en estos mismos periodos la mayoría de la población realiza sus vacaciones anuales y en consecuencia no utiliza su vivienda habitual.

Cabe destacar también la gran variación que hay entre los periodos 05-07 del 2020 y 07-08 del 2020. En estas fechas todavía había restricciones de movilidad personal a consecuencia del confinamiento por el COVID. De mayo a julio (05-07), el consumo energético de ACS para todo el edificio fue de 9,70 kWh/día, resultado propio de un periodo extraordinario en el que los habitantes pasaban un mayor número de horas en casa y no podían realizar actividades físicas que justifican un mayor consumo de agua caliente. En cambio, el siguiente periodo, 07-08 del 2020, es el más bajo de todos los analizados, con sólo 3,80 kWh/día (y en el que también es mayor la diferencia con respecto al cálculo teórico). En ese mismo periodo, inmediato al final del confinamiento, la mayoría de la población se lanzó a un cambio de aires después de los meses de confinamiento, cosa que hizo disminuir marcadamente el consumo de ACS doméstico.

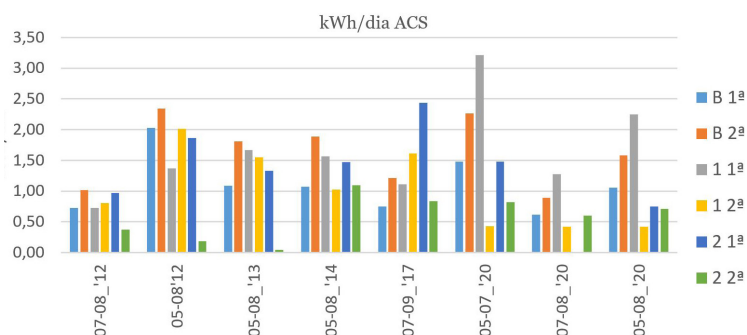


Figura 6. consumo de energía para ACS por vivienda. Fuente: autores

⁶ <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DBHE.pdf>

Para tener una imagen más precisa de la distribución del consumo energético, según cada vivienda del caso de estudio, se realizó la figura 6 : consumo de energía para ACS por cada vivienda.

Cabría esperar que estos consumos agrupados por vivienda fueran proporcionales al número de personas que habitan en cada una; en cambio, en la mayoría de los casos estos dos valores (energía ACS y nº de habitantes) no guardan una relación estable de proporcionalidad.

Se destaca, por ejemplo, que el consumo de la vivienda 1ª presenta un valor máximo en relación a los otros intervalos de tiempo y a las otras viviendas analizadas. Se remarca que en esta vivienda habitan 4 personas, las cuales convivieron durante todo el confinamiento citado.

Se puede apreciar en la figura 7 que el consumo de la vivienda B2ª, donde sólo han habitado 1 o 2 personas a lo largo de los años, presenta unos valores de consumo muy superiores, tanto en relación a sus vecinos como al consumo teórico calculado.

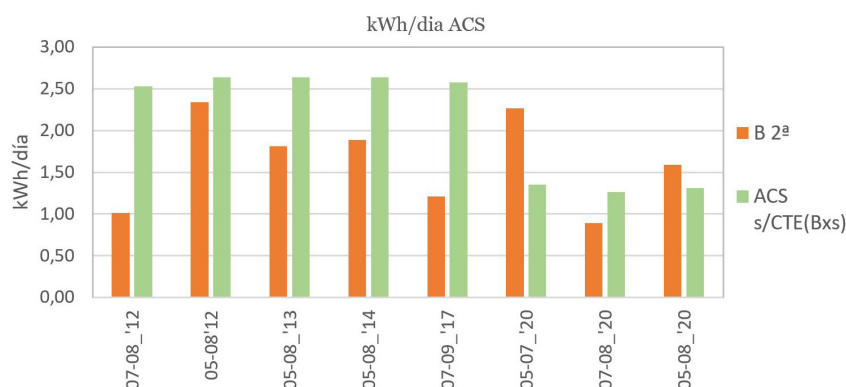


Figura 7. consumo B2ª y demanda teórica de ACS. Fuente: autores

6. CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha descrito la rehabilitación energética que se llevó a cabo en un edificio urbano, entre medianeras, de 6 viviendas, y se ha analizado también su consumo energético real a lo largo de un periodo considerado de 10 años posteriores a dicha rehabilitación.

Los sistemas pasivos aplicados durante la rehabilitación energética han demostrado ser muy efectivos, lo que ha permitido reducir el consumo de energía para calefacción en todas las viviendas, independientemente del grado de concienciación y clase social de las personas que habitan en cada vivienda [20], [28], [29]. El sistema colectivo de producción y distribución de energía térmica para calefacción y agua caliente ha resultado efectivo y lo que más aprecian los ocupantes del edificio estudiado es el bajo coste económico que les supone.

El análisis energético realizado apunta, en primer lugar, a la gran diferencia entre el consumo real contabilizado tanto con respecto a las fuentes oficiales consultadas [7], [22], [23], [30] como con respecto a los consumos definidos en el Certificado de Eficiencia Energética (CEE), o como con respecto a los Anejos del CTE DB.HE, en relación al agua caliente sanitaria.

Por otro lado, el análisis realizado evidencia que la distribución del consumo energético por cada vivienda no es siempre el esperado por su superficie o por su número de habitantes. Estas diferencias pueden ser atribuidas bien al mal funcionamiento del contador energético, bien a soluciones constructivas mal ejecutadas o bien a considerar partes de la envolvente térmica como adiabáticas cuando en la realidad no lo son.

Los sistemas activos de ventilación con recuperación de calor, dado que debe programarlos y mantenerlos el propio usuario [31], no han demostrado ser una medida eficaz de ahorro pues solamente uno de los seis vecinos lo usa habitualmente, y con éxito evidente. Este mismo vecino ha destacado la mejora apreciada en su ambiente interior, tanto por la reducción de polvo como por el ahorro derivado en consumo energético para calefacción (un sistema de ventilación con recuperación de calor puede llegar a ahorrar hasta un 30% de consumo de energía para calefacción). Es esta vivienda la que proporcionalmente tiene un menor consumo de energía. [32], [33].

Destacar pues, la relevancia de los parámetros que influyen en el consumo de energía térmica y que están íntimamente ligados a los usuarios: ratificar las conclusiones sobre adecuadas pautas de uso [12], [13], [14], [15], [34] y adecuados conocimientos en la gestión de la vivienda [20], [35] aspectos con un potencial muy por encima de lo previsto y que puede llegar a deformar totalmente la distribución teórica de los consumos energéticos esperados a priori en un edificio adecuadamente rehabilitado energéticamente. Un aspecto positivo colateral a resaltar es el hecho que, debido al conocimiento mutuo del consumo energético entre los vecinos, se han generado entre ellos dinámicas de contraste y de consejos para mejorar así la eficiencia y ahorro energético de las diferentes familias habitantes [36].

Por último, remarcar la necesidad y utilidad de llevar a cabo estos seguimientos decenales

que permiten validar las decisiones iniciales tomadas diez años atrás y así mejorar el acierto de las decisiones actuales y futuras.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los/as autores/as de este artículo declaran no tener conflictos de intereses financieros, profesionales o personales que pudieran haber influido de manera inapropiada en este trabajo.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Oriol Muntané Raich: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Administración de proyecto, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

Joan-Lluís Zamora Mestre: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Redacción – revisión y edición.

Ignacio Costales Calvo: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Redacción – revisión y edición.

REFERENCIAS

- [1] Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética de los edificios. Ministerio de la Presidencia, Justicia y Relaciones con las Cortes, 2010., <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2010-81077>
- [2] Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, Directiva (UE) 2023/1791 del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de septiembre de 2023 relativa a la eficiencia energética y por la que se modifica el Reglamento (UE) 2023/955 (versión refundida)., Ministerio de la Presidencia, Justicia y Relaciones con las Cortes, 2023., <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2023-81299>
- [3] A., S. P. Cuchí, Estrategia para la rehabilitación. Claves para la transformación del sector de la edificación en España, 2014. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/133849/201804_Estudio_distribucion_consumo_energetico_res.pdf
- [4] J. Ludevid, Hacia la generalización de la rehabilitación integral o arquitectónica de la edificación Española, *Informes de la Construcción*, vol. 67, no. Extra1, 2015, <http://doi.org/10.3989/ic.14.053>
- [5] M. J. Ruá Aguilar, M. Braulio Gonzalo, and Á. Barragán Cervera, *Rehabilitación energética en edificación*. Universitat Jaume I, 2017. <http://doi.org/10.6035/sapientia124>
- [6] Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana, Observatorio de Vivienda y Suelo. Boletín núm. 47, Tercer trimestre 2023. <https://www.apirm.es/wp-content/uploads/2024/02/ObservatoriodeviviendaysueloBoletinnm47tercertrimestre2023.pdf>
- [7] ICAEN. Institut Català d'Energia, Edificis de consum d'energia gairebé zero. Col·lecció Quadern Pràctic. Número 11, ICAEN. Institut Català d'Energia, 2017., https://icaen.gencat.cat/web/.content/10_ICAEN/17_publicacions_informes/04_coleccio_QuadernPractic/quadern_practic/arxius/11_Edificis_energia_zero.pdf
- [8] European Commission, Renovation Wave, European Commission, 14 Octubre 2020., https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave_en
- [9] Secretaría General de Agenda Urbana y Vivienda. Dirección General de Agenda Urbana y Arquitectura, Estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España, Secretaría General de Agenda Urbana y Vivienda. Dirección General de Agenda Urbana y Arquitectura, 2014-2017-2020., <https://www.transportes.gob.es/el-ministerio/planes-estrategicos/estrategia-a-largo-plazo-para-la-rehabilitacion-energetica-en-el-sector-de-la-edificacion-en-espana>
- [10] J. Weiss, E. Dunkelberg, and T. Vogelpohl, Improving policy instruments to better tap into homeowner refurbishment potential: Lessons learned from a case study in Germany, *Energy Policy*, vol. 44, 2012, <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.02.006>
- [11] M. Naaranoja and L. Uden, Major problems in renovation projects in Finland, *Build Environ*, vol. 42, no. 2, 2007, <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.10.001>
- [12] A. L. Pisello and F. Asdrubali, Human-based energy retrofits in residential buildings: A cost-effective alternative to traditional physical strategies, *Appl Energy*, vol. 133, 2014, <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.049>
- [13] B. Gucyeter, Evaluating diverse patterns of occupant behavior regarding control-based activities in energy performance simulation, *Frontiers of Architectural Research*, vol. 7, no. 2, 2018, <http://doi.org/10.1016/j.foar.2018.03.002>
- [14] M. Samarutunga, L. Ding, K. Bishop, D. Prasad, and K. W. K. Yee, Modelling and Analysis of Post-occupancy Behaviour in Residential Buildings to Inform BASIX Sustainability Assessments in NSW, in *Procedia Engineering*, 2017. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.193>
- [15] F. Ascione, N. Bianco, R. F. De Masi, M. Mastellone, G. M. Mauro, and G. P. Vanoli, The role of the occupant behavior in affecting the feasibility of energy refurbishment of residential buildings: Typical effective retrofits compromised by typical wrong habits, *Energy Build*, vol. 223, p. 110217, Sep. 2020, <http://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2020.110217>
- [16] European Parliament and of the Council, Directive (EU) 2018/844, PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO, 30 mayo 2018., <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/844/oj>
- [17] A. C. Menezes, A. Cripps, D. Bouchlaghem, and R. Buswell, Predicted vs. actual energy performance of non-domestic buildings: Using post-occupancy evaluation data to reduce the performance gap, *Appl Energy*, vol. 97, 2012, <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.075>
- [18] M. Elsayed, S. Pelsmakers, L. Pistore, R. Castaño-Rosa, and P. Romagnoni, Post-occupancy evaluation in residential buildings: A systematic literature review of current practices in the EU, 2023. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110307>
- [19] E. F. N. G. and O. G.-S. Cuerda, Post-occupancy monitoring of two flats in Madrid: Development and assessment of a mixed methods methodology, in *PLEA2015 Architecture in (R) Evolution. Association of Building Green Futures*, 2015. <https://oa.upm.es/38270/> https://oa.upm.es/38270/1/P_528.pdf
- [20] C. Alonso, I. Oteiza, F. Martín-Consuegra, and B. Frutos, Methodological proposal for monitoring energy refurbishment. Indoor environmental quality in two case studies of social housing in Madrid, Spain, *Energy Build*, vol. 155, pp. 492–502, Nov. 2017, <http://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2017.09.042>
- [21] ICAEN, OBSERVATORI DE L'ESTAT ENERGÈTIC D'EDIFICIS DE CATALUNYA, May 2020. <https://icaen.gencat.cat/ca/detalls/publicacio/Observatori-de-lestat-energetic-dels-edificis-a-catalunya-00002>
- [22] IDAE, Project Sech-Spahousec, Analysis of the Energetic Consumption of the Residential Sector in Spain (Proyecto Sech-Spahousec, Análisis del consumo energético del sector residencial en España), 2016. https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Informe_SPAHOUSEC_ACC_f68291a3.pdf
- [23] A. Cuchí, J. Arcas-Abella, and A. Pagès-Ramon, Estudio de la distribución del consumo energético residencial para calefacción en España, Dec. 2017. Accessed: Feb. 11, 2025. [Online]. Available: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/133849/201804_Estudio_distribucion_consumo_energetico_res.pdf
- [24] Intelligence Enargy Europe, SQUARE: A Quality Assurance (QA) system, Intelligence Enargy Europe, 2010. , <http://www.iee-square.eu/>
- [25] Televisió de Catalunya (TV3), El medi ambient 'Rehabilitació energèticament eficient.' Documental, Spain, 2010. Accessed: Feb. 11, 2025. [Online]. Available: <https://blog.tvalacarta.info/video/tv3/el-medi-ambient/06-05-2010-rehabilitacio-energeticament-eficient/>
- [26] J. Palonen, SQUARE - A System for Quality Assurance when Retrofitting Existing Buildings to Energy Efficient Buildings, 2010. Accessed: Feb. 11, 2025. [Online]. Available: http://eprints.sparaochbevara.se/590/1/SQUARE_%2520National_Conditions_Energy_savings_retrofitting_social_housing_EN.pdf
- [27] E. y. T. M. d. F. Ministerio de Industria, 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, Resolución conjunta de los Ministerios de Industria, Energía y Turismo, y Ministerio de Fomento, 2014., https://www.miteco.gob.es/content/dam/mitesco/es/energia/files-1/Eficiencia/RITE/documentosreconocidosrite/Otros%20documentos/Factores_emision_CO2.pdf
- [28] L. Camprubi et al., Façade insulation retrofitting policy implementation process and its effects on health equity determinants: A realist review, *Energy Policy*, vol. 91, 2016, <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.01.016>
- [29] Fifth Assessment Report—Impacts, Adaptation and Vulnerability, 2014.
- [30] J. M. Hernández Sánchez, Consumo energético y emisiones asociadas del sector residencial, in *International Congress on Project Engineering. 15th International Congress on Project Engineering*, 2012. https://www.researchgate.net/publication/220002003_Consumo_energetico_y_emisiones_asociadas_del_sector_residencial

- [31] M. Ortiz, L. Itard, and P. M. Bluyssen, Indoor environmental quality related risk factors with energy-efficient retrofitting of housing: A literature review, *Energy Build*, vol. 221, 2020, <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110102>
- [32] O. Kinnane, D. Sinnott, and W. J. N. Turner, Evaluation of passive ventilation provision in domestic housing retrofit, *Build Environ*, vol. 106, 2016, <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.032>
- [33] C. R. W. Jr., R. K. V. Jeffrey K. Sonne, Are Residential Whole-House Mechanical Ventilation Systems Reliable Enough to Mandate Tight Homes?, in *IAQ Conference*, 2016, <https://publications.energyresearch.ucf.edu/wp-content/uploads/2018/06/FSEC-PF-469-16.pdf>
- [34] T. Hong, D. Yan, S. D'Oca, and C. fei Chen, Ten questions concerning occupant behavior in buildings: The big picture, *Build Environ*, vol. 114, 2017, <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.006>
- [35] A. Roetzel, A. Tsangrassoulis, U. Dietrich, and S. Busching, On the influence of building design, occupants and heat waves on comfort and greenhouse gas emissions in naturally ventilated offices. A study based on the EN 15251 adaptive thermal comfort model in Athens, Greece, *Build Simul*, vol. 3, no. 2, 2010, <http://doi.org/10.1007/s12273-010-0002-7>
- [36] I. Ayres, S. Raseman, and A. Shih, Evidence from Two Large Field Experiments that Peer Comparison Feedback Can Reduce Residential Energy Usage, *J Law Econ Organ*, vol. 29, no. 5, 2013, <http://doi.org/10.1093/jleo/ews020>