



Received: 30/05/2024

Accepted: 15/06/2024

Anales de Edificación

Vol. 10, Nº2, 33-39 (2024)

ISSN: 2444-1309

DOI: 10.20868/ade.2024.5468

Dos estudios de casos de rehabilitación de distritos que combinan la eficiencia energética y las energías renovables

Two case studies of district-level refurbishment combining energy efficiency and renewable energies.

Raúl Briones-Llorente^a; Juan María Hidalgo-Betanzos^b; Mohamed Lifi^a; Gabriel Rubio-Pérez^c; Natalia Muñoz-Rujas^d; Fernando Aguilar Romero^d

^a Universidad de Burgos. Departamento de Matemáticas y Computación. Grupo de Investigación en Ingeniería Energética (iENERGÍA), Burgos, España.

^b Universidad del País Vasco UPV/EHU. Departamento de Ingeniería Energética. Grupo de Investigación ENEDI (Energética en la Edificación), Vitoria-Gasteiz, España

^c Universidad de Burgos. Departamento de Digitalización. Grupo de Investigación en Ingeniería Energética (iENERGÍA), Burgos, España

^d Universidad de Burgos. Departamento de Ingeniería Electromecánica. Grupo de Investigación en Ingeniería Energética (iENERGÍA), Burgos, España

Resumen-- Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU abordan desafíos globales como el cambio climático, la salud pública y el desarrollo económico. En Europa, los edificios representan el 50% del consumo energético y el 30% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Las estrategias clave incluyen la rehabilitación energética y la descarbonización del parque edificatorio para mejorar la calidad de vida, la salud pública y la equidad energética.

Este artículo analiza dos casos de rehabilitación energética a nivel de barrio: el Complejo Habitacional Picoto en Braga (Portugal) y el barrio Adurtza en Vitoria-Gasteiz (España). Bajo el Proyecto Annex 75 de la Agencia Internacional de la Energía, se realizaron evaluaciones in situ, simulaciones y medidas de renovación pasiva, como mejoras en la envolvente y sistemas de ventilación con recuperación de calor. También se priorizó el uso de energías renovables. Aunque el potencial de ahorro es significativo, persisten retos de costos e implementación.

Palabras clave— Rentabilidad; Distrito; Eficiencia energética; Rehabilitación energética; Energías renovables..

Abstract— The UN's 17 Sustainable Development Goals (SDGs) address global issues like climate change, public health, and economic development. In Europe, buildings account for 50% of energy use and 30% of greenhouse gas emissions (GHG). Key strategies for improvement include energy rehabilitation and decarbonization of buildings to enhance quality of life, public health, and energy equity.

This paper examines two district-level energy rehabilitation cases: the Picoto Housing Complex in Braga, Portugal, and the Adurtza neighbourhood in Vitoria-Gasteiz, Spain. Conducted under the Annex 75 Project by the International Energy Agency, the studies involved on-site assessments, simulations, and passive renovation measures, such as envelope improvements and ventilation upgrades with heat recovery. Renewable energy solutions were also prioritized. While significant energy-saving potential was identified, challenges in costs and implementation remain. Contributions from the universities of Minho, the Basque Country, and Burgos provided insights into sustainable urban development and energy-efficient building strategies.

Index Terms— Cost-effectiveness; District; Energy efficiency; Energy refurbishment; Renewable energies.

R.B.L. es profesor contratado del Departamento de Matemáticas y Computación de la Universidad de Burgos, miembro del Grupo de Investigación en Ingeniería Energética (iENERGÍA), en Burgos, España. J.M.H.B. es profesor del Departamento de Ingeniería Energética de la

Universidad del País Vasco UPV/EHU, integrante del Grupo de Investigación ENEDI (Energética en la Edificación), en Vitoria-Gasteiz, España. M.L. es investigador del Departamento de Matemáticas y Computación de la

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la humanidad se enfrenta a una grave crisis climática que compromete la conservación del planeta, la salud de las personas y el desarrollo económico. Entre las distintas acciones internacionales para frenar en lo posible esta situación y mitigar sus efectos adversos, destacan los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible plasmados por la Asamblea General de las Naciones Unidas en la Agenda 2030 (United Nations, 2015), y que han sido adaptados en sus legislaciones por los países firmantes.

En Europa, aproximadamente el 50 % del consumo de energía corresponde a los edificios (International Energy Agency, 2019), e igualmente son responsables del 30 % de las emisiones de gases de efecto invernadero (Global Buildings Performance Network [GBPN], 2013). Entre las líneas de actuación propuestas para un uso eficiente de la energía y para la creación de ciudades y comunidades sostenibles, unas de las más importantes son las acciones para rehabilitar energéticamente el parque edificatorio existente y su descarbonización. Especialmente, por su capacidad de mejorar la calidad de vida y la salud de las personas, así como de reducir la pobreza energética.

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

En este contexto, el Proyecto de Investigación de la Agencia Internacional de la Energía: IEA EBC Annex 75 - Cost-effective Building Renovation at District Level Combining Energy Efficiency & Renewables (International Energy Agency, 2017), clausurado el pasado 10 de octubre de 2023, ha tenido como principal objetivo el determinar la rentabilidad de varios enfoques que combinan medidas de mejora de la eficiencia energética y medidas de implementación de energía renovable a nivel de distrito, siendo complejo encontrar el equilibrio entre ambos tipos de actuaciones para el parque de edificios existente. Además, se ha proporcionado orientación a los responsables políticos, a las empresas que trabajan en el campo de la transición energética, así como a los propietarios de edificios para transformar de manera rentable el actual modelo de uso de energía en el parque de edificios existentes en las ciudades hacia soluciones de bajas emisiones y bajo consumo de energía.

En este Proyecto han participado aproximadamente cincuenta investigadores de trece países, y la Investigadora Principal (IP) ha sido la Doctora Manuela Almeida, de la Universidade do Minho (Portugal). En este artículo, se muestra la participación en el estudio de dos barrios en España y Portugal, dentro de la Subtarea C: Casos de estudio. Algunos de los autores, ya han participado en publicaciones anteriores

relativas a este Proyecto de Investigación (Barbosa et al., 2022) (International Energy Agency, 2023a) (Terés-Zubiaga et al., 2020).

Toda la información relativa al Proyecto de Investigación IEA EBC Annex 75, está disponible en acceso abierto a través de su página web (International Energy Agency, 2017)..

II. METODOLOGÍA

Para el estudio de ambos barrios se ha seguido un procedimiento similar.

En una primera parte, se ha estudiado la documentación existente de los proyectos de ejecución, se han realizado visitas in situ para verificar los datos previos y para completar la información, y se han hecho algunos ensayos de termografía infrarroja.

Partiendo de esta información previa, se ha procedido a la caracterización geométrica y constructiva de los edificios. Se han hecho las simulaciones energéticas del estado actual del conjunto de edificios de cada barrio, utilizando el programa de SG SAVE (Efinovatic, 2023), que se combina con Open Studio (National Laboratory of the U.S. Department of Energy, 2023), y que para la modelización en tres dimensiones se apoya en SketchUp (Trimble Inc., 2023).

Finalmente, y a la vista de los resultados obtenidos, se han propuesto medidas de mejora de la eficiencia energética a nivel de distrito, incidiendo en las envolventes térmicas y, en Adurtza, también en la ventilación con recuperación de calor. Con ellas se han realizado múltiples simulaciones energéticas, y se ha estudiado la combinación de los mejores conjuntos de medidas de mejora con opciones de renovación de sus instalaciones energéticas, priorizando las energías renovables.

A. Complejo Habitacional Picoto – Braga (Portugal)

El Complejo Habitacional Picoto está formado por cincuenta viviendas sociales unifamiliares adosadas de doble altura, agrupadas en siete manzanas sobre un terreno en ladera, como se puede ver en la Fig. 1a. La Fig. 1b muestra la modelización energética de una de las alineaciones de viviendas adosadas. La fecha de construcción aproximada es el año 1990, y su estado de conservación es bastante deficiente. La superficie habitable de 1.767 m².

La ciudad de Braga está situada en el interior del extremo norte de Portugal, a menos de 40 kilómetros de la costa atlántica, y a una altura de 215 metros sobre el nivel del mar. Presenta un clima templado, con inviernos húmedos y veranos secos, similar al interior de la Provincia de Pontevedra en España, lo que según el Documento Básico DB HE (Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana del Gobierno de España, 2022) equivaldría a un clima tipo C1.

En la Tabla 1 se resumen las principales características constructivas de la envolvente de los edificios en su estado actual y de los distintos paquetes de medidas de mejora (P1 – P5) propuestos, así como los valores de transmitancia térmica,



Fig. 1. Imágenes del Complejo Habitacional Picoto: (a) Vista aérea. Fuente: Google Maps. (b) Modelización energética.

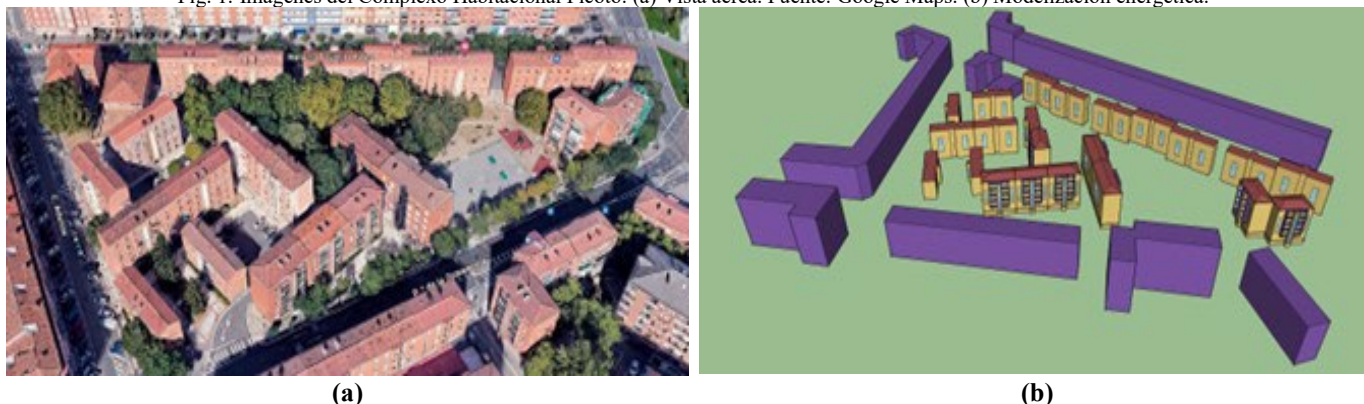


Fig. 2. Imágenes del Barrio de Adurtza: (a) Vista aérea. Fuente: Google Maps. (b) Modelización energética.

U (W/m²K), de los cerramientos y los huecos.

A nivel de instalaciones térmicas, las viviendas sólo disponen de calentadores para agua caliente sanitaria (ACS) con gas natural y radiadores portátiles eléctricos. En la Tabla 2 se muestran las características de las cinco propuestas de nuevos sistemas de suministro energético: I1 – Descentralizado convencional; I2 – Centralizado con bomba de calor; I3 – Centralizado con caldera de biomasa; I4 – Centralizado con bomba de calor y energía solar térmica; I5 – Centralizado con bomba de calor y energía solar fotovoltaica.

B. Barrio de Adurtza – Vitoria Gasteiz (España)

La parte central del Barrio de Adurtza la componen veintidós bloques de viviendas de cinco y tres alturas y de dos tipologías diferentes, como se aprecia en la Fig. 2a. La Fig. 2b muestra la modelización energética completa del barrio. La construcción

abarca las décadas de 1950 y 1960, y los edificios no han sido renovados desde entonces. La superficie habitable total es de 13.870 m².

La ciudad de Vitoria-Gasteiz está situada en el interior del País Vasco, a menos de 80 kilómetros de la costa cantábrica, y a una altura de 540 metros sobre el nivel del mar. Su clima es oceánico, con inviernos fríos y húmedos y veranos frescos. Según el Documento Básico DB HE es zona climática D1.

En la Tabla 3 se resumen las principales características constructivas y prestaciones térmicas de la envolvente de los edificios, desde su estado actual a los diferentes paquetes de medidas de mejora propuestos (P1 – P6). Los paquetes P4 y P6, tienen la misma envolvente que los P3 y P5, pero añaden sistemas de ventilación con recuperador de calor, con un rendimiento del 85 %.

RESUMEN CONSTRUCTIVO Y PRESTACIONES TÉRMICAS EN CASO DE PICOTO, ESTADO ACTUAL Y MEJORAS PROPUESTA

	Actual	P1	P2	P3	P4	P5
Cubiertas	Paneles de fibrocemento sin aislamiento U: 8,29	Panel sándwich PUR(2) 30 mm U: 0,90	Panel sándwich MW(3) 30 mm U: 0,90	Panel sándwich PUR(2) 30 mm U: 0,90	Panel sándwich MW(3) 100 mm U: 0,39	Panel sándwich MW(3) 100 mm U: 0,39
Fachadas	Fábricas cerámicas sin aislamiento U: 1,44 – 3,06	SATE(3) MW(4) 80 mm U: 0,34 – 0,39	SATE(3) EPS(8) 80 mm U: 0,35 – 0,41	SATE(3) EPS(8) 80 mm U: 0,35 – 0,41	SATE(3) EPS(8) 80 mm 120 mm U: 0,34 – 0,27	SATE(3) MW(4) 160 mm 200 mm U: 0,19 – 0,17
Huecos	Marco de aluminio sin RPT(1) y vidrio simple U: 5,10	Marco de PVC(5) con RPT(1) y vidrio doble con BE(6) y SC(7) U: 1,40	Marco de aluminio con RPT(1) y vidrio doble U: 3,30	Marco de aluminio con RPT(1) y vidrio doble U: 3,30	Marco de aluminio con RPT(1) y vidrio doble U: 3,30	Marco de PVC(5) con RPT(1) y vidrio doble con BE(6) y SC(7) U: 1,40

*⁽¹⁾ RPT: rotura de puente térmico; ⁽²⁾ PUR: espuma de poliuretano; ⁽³⁾ SATE: sistema de aislamiento térmico por el exterior; ⁽⁴⁾ MW: lana mineral; ⁽⁵⁾ PVC: policloruro de vinilo; ⁽⁶⁾ BE: baja emisividad; ⁽⁷⁾ CS: control solar; ⁽⁸⁾ EPS: poliestireno expandido

TABLA II
RESUMEN DE LAS INSTALACIONES TÉRMICAS EN CASO DE PICOTO, ESTADO ACTUAL Y MEJORAS PROPUESTAS

	Actual	I1	I2	I3	I4	I5
Calefacción	Radiador Eléctrico R ⁽¹⁾ : 1,00	Radiador Eléctrico R ⁽¹⁾ : 1,00	Bomba de calor Eléctrica COP ⁽³⁾ : 4,06 SCOP ⁽⁴⁾ : 3,77	Caldera Biomasa R ⁽¹⁾ : 1,07	Bomba de calor Eléctrica COP ⁽³⁾ : 4,06 SCOP ⁽⁴⁾ : 3,77	Bomba de calor Eléctrica COP ⁽³⁾ : 4,06 SCOP ⁽⁴⁾ : 3,77
Refrigeración	Virtual Eléctrico R ⁽¹⁾ : 1,00	Multi – Split Eléctrico EER ⁽²⁾ : 3,00	Bomba de calor Eléctrica EER ⁽²⁾ : 3,97 SEER ⁽⁵⁾ : 8,41	Virtual Eléctrico R ⁽¹⁾ : 1,00	Bomba de calor Eléctrica EER ⁽²⁾ : 3,97 SEER ⁽⁵⁾ : 8,41	Bomba de calor Eléctrica EER ⁽²⁾ : 3,97 SEER ⁽⁵⁾ : 8,41
Agua caliente sanitaria (ACS)	Calentador Gas natural R ⁽¹⁾ : 0,80	Calentador Gas natural R ⁽¹⁾ : 0,80	Bomba de calor Eléctrica COP ⁽³⁾ : 4,10	Caldera Biomasa R ⁽¹⁾ : 1,07	Bomba de calor Eléctrica COP ⁽³⁾ : 4,10	Bomba de calor Eléctrica COP ⁽³⁾ : 4,10
Energías renovables	---	---	---	---	Solar térmica para a.c.s.	Solar fotovoltaica

⁽¹⁾ R: rendimiento nominal; ⁽²⁾ EER: coeficiente de eficiencia energética para refrigeración; ⁽³⁾ COP: coeficiente de eficiencia energética para calefacción; ⁽⁴⁾ SCOP: coeficiente de eficiencia energética estacional para calefacción; ⁽⁵⁾ SEER: coeficiente de eficiencia energética estacional para refrigeración

TABLA III
RESUMEN CONSTRUCTIVO Y PRESTACIONES TÉRMICAS EN CASO DE ADURTZA, ESTADO ACTUAL Y MEJORAS PROPUESTAS

	Actual	P1	P2	P3 – P4	P5 – P6
Cubiertas	Teja cerámica sin aislamiento U: 1,69 – 2,90	Panel EPS(4) 80 – 90 mm U: 0,37	Panel EPS(4) 145 – 155 mm U: 0,23	Panel EPS(4) 160 – 170 mm U: 0,23 – 0,21	Panel EPS(4) 180 – 190 mm U: 0,19
Fachadas	Fábricas cerámicas sin aislamiento U: 1,79 – 1,95	SATE(5) EPS(4) 65 – 67 mm U: 0,44	SATE(5) EPS(4) 115 mm U: 0,28	SATE(5) EPS(4) 120 mm U: 0,27	SATE(5) EPS(4) 125 mm U: 0,26
Huecos	Marco de aluminio con RPT(1) y vidrio doble U _f (2): 4,00 U _g (3): 2,80 – 5,70	Marco de PVC(6) con RPT(1) y vidrio doble con BE(7) U _f (2): 1,80 U _g (3): 1,60	Marco de PVC(6) con RPT(1) y vidrio doble con BE(7) U _f (2): 1,50 U _g (3): 1,40	Marco de PVC(6) con RPT(1) y vidrio doble con BE(7) U _f (2): 1,20 U _g (3): 1,19	Marco de PVC(6) con RPT(1) y vidrio doble con BE(7) U _f (2): 0,90 U _g (3): 0,97

⁽¹⁾ RPT: rotura de puente térmico; ⁽²⁾ U_f: transmitancia térmica del marco; ⁽³⁾ U_g: transmitancia térmica del vidrio; ⁽⁴⁾ EPS: poliestireno expandido; ⁽⁵⁾ SATE: sistema de aislamiento térmico por el exterior; ⁽⁶⁾ PVC: policloruro de vinilo; ⁽⁷⁾ BE: baja emisividad.

TABLA IV
R RESUMEN DE LAS INSTALACIONES TÉRMICAS EN CASO DE ADURTZA, ESTADO ACTUAL Y MEJORAS PROPUESTAS

	Actual	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
Calefacción	Calderas 90 % Gas natural R ⁽¹⁾ : 0,85 10% Eléc. R ⁽¹⁾ : 1,00	Individual BC ⁽²⁾ mixta COP ⁽³⁾ : 2,50 SCOP ⁽⁴⁾ : 1,81	Individual Radiador Eléctrico R ⁽¹⁾ : 1,00	Edificio BC ⁽²⁾ mixta COP ⁽³⁾ : 4,06 SCOP ⁽⁴⁾ : 3,77	Edificio Caldera Biomasa R ⁽¹⁾ : 1,02	Distrito Caldera Biomasa R ⁽¹⁾ : 1,02	Distrito BC ⁽²⁾ mixta Geotermia COP ⁽³⁾ : 4,80 SCOP ⁽⁴⁾ : 3,50	Distrito BC ⁽²⁾ mixta Aeroater. COP ⁽³⁾ : 4,20 SCOP ⁽⁴⁾ : 2,60
Refrigeración	Virtual Eléctrico R ⁽¹⁾ : 1,00	Virtual Eléctrico R ⁽¹⁾ : 1,00	Virtual Eléctrico R ⁽¹⁾ : 1,00	Virtual Eléctrico R ⁽¹⁾ : 1,00	Virtual Eléctrico R ⁽¹⁾ : 1,00	Virtual Eléctrico R ⁽¹⁾ : 1,00	Virtual Eléctrico R ⁽¹⁾ : 1,00	Virtual Eléctrico R ⁽¹⁾ : 1,00
Agua caliente sanitaria (ACS)	Calderas 90 % Gas natural R ⁽¹⁾ : 0,85 10% Eléc. R ⁽¹⁾ : 1,00	Individual BC ⁽²⁾ mixta COP ⁽³⁾ : 2,50 SCOP ⁽⁴⁾ : 1,81	Individual BC ⁽²⁾ COP ⁽³⁾ : 2,50	Edificio BC ⁽²⁾ mixta COP ⁽³⁾ : 4,06 SCOP ⁽⁴⁾ : 3,77	Edificio Caldera Biomasa R ⁽¹⁾ : 1,02	Distrito Caldera Biomasa R ⁽¹⁾ : 1,02	Distrito BC ⁽²⁾ mixta Geotermia COP ⁽³⁾ : 4,80 SCOP ⁽⁴⁾ : 3,50	Distrito BC ⁽²⁾ mixta Aeroater. COP ⁽³⁾ : 4,20 SCOP ⁽⁴⁾ : 2,60

⁽¹⁾ R: rendimiento nominal; ⁽²⁾ BC: bomba de calor; ⁽³⁾ COP: coeficiente de eficiencia energética para calefacción; ⁽⁴⁾ SCOP: coeficiente de eficiencia energética estacional para calefacción

calefacción y ACS, con el 90 % de calderas de gas natural, y el 10 % eléctricos. En la Tabla 4 se muestran las características de las siete propuestas: I1 – Descentralizado mixto con aerotermia; I2 – Descentralizado con aerotermia para ACS y calefacción eléctrica; I3 – Centralizado por edificios mixto con aerotermia; I4 – Centralizado por edificios mixto con caldera de biomasa; I5 – Centralizado por distrito con caldera de biomasa; I6 – Centralizado por distrito mixto con geotermia; I7 – Centralizado por distrito mixto con aerotermia.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se han obtenido múltiples resultados relacionados con indicadores como el consumo de energía primaria, las emisiones de CO₂, y el coste anual incluyendo los gastos de inversión y de mantenimiento. En este artículo se va a destacar el estudio de coste – efectividad, que sirve para comparar el estado actual, mejoras en envolvente, e intervenciones que no mejoren la envolvente sino sólo las instalaciones. Todo ello, considerando costes de inversión, energía y mantenimiento en 30 años. Se ha considerado una vida útil de 30 años para la envolvente (a excepción de 20 años para las ventanas en Adurtza), y de 15 a 20 años para instalaciones. Se ha aplicado

el 4 % anual tanto a la tasa de descuento, como al incremento del precio de la energía. Es importante destacar que el caso de referencia, estado actual, también tiene costes de mantenimiento, aunque no impliquen ninguna mejora energética, por lo que no rehabilitar siempre tiene coste. Las Fig. 3 y 4 presentan los resultados para Picoto y Adurtza.

En Picoto, el caso de referencia presenta un coste de 80,00 €/m²a, un consumo de energía primaria de 449,60 kWh/m²a, y unas emisiones de CO₂ de 66,60 kg CO₂/m²a.

En cuanto al consumo de energía primaria, el caso más bajo es de 57,70 kWh/m²a, y se obtiene combinando el paquete de medidas de mejora P1 (Tabla 1) con el sistema energético I5 (Tabla 2), y tiene un coste de 56,90 €/m²a. El consumo de energía primaria más alto es el del caso de referencia.

En relación con las emisiones de CO₂, las más bajas son de 0,00 kg CO₂eq/m²a, y se obtienen combinando todos los paquetes de medidas de mejora, P1 a P5 (Tabla 1), con el sistema energético I3 (Tabla 2). Los costes anuales son, respectivamente: 70,00; 67,90; 65,80; 67,80 y 77,70 €/m²a. Las emisiones de CO₂ más altas son las del caso de referencia.

El análisis de costes a 30 años indica que, el coste más bajo es de 47,60 €/m²a, con la combinación de envolvente P2 (Tabla 1) e instalaciones I2 (Tabla 2). Por el contrario, el coste más

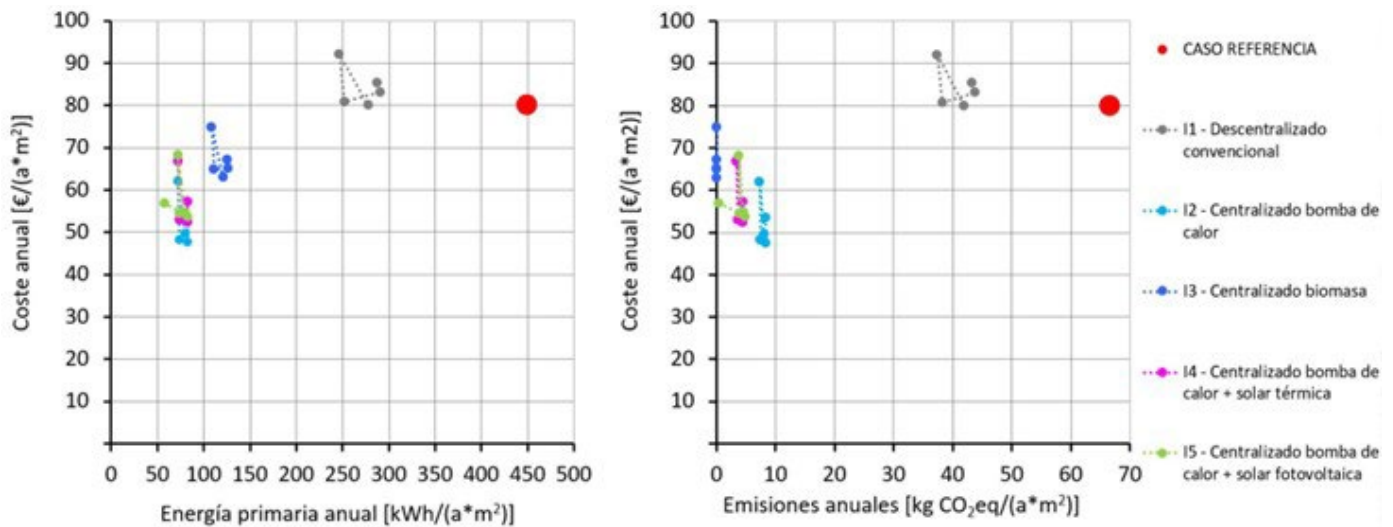


Fig. 3. Resumen de las combinaciones de paquetes de medidas de mejora energética de la envolvente con nuevos sistemas energéticos para el Complejo Habitacional Picoto. Fuente: IEA EBC Annex 75 (International Energy Agency, 2023a, 2023b)

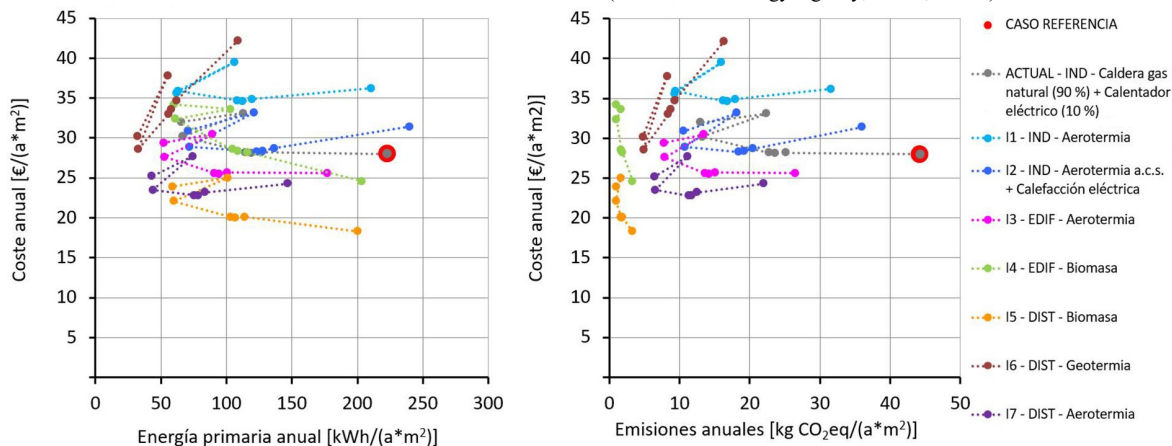


Fig. 4. Resumen de las combinaciones de paquetes de medidas de mejora energética de la envolvente con nuevos sistemas energéticos para el Barrio de Adurtza. Fuente: IEA EBC Annex 75 (International Energy Agency, 2023a, 2023b)

alto es de 92,10 €/m²a, aplicando la envolvente P4 (Tabla 1) con instalaciones I1 (Tabla 2).

En Adurtza, el caso de referencia presenta un coste de 28,00 €/m²a, un consumo de energía primaria de 223,00 kWh/m²a, y unas emisiones de CO₂ de 44,20 kg CO₂eq/m²a.

En cuanto al consumo de energía primaria, el más bajo es de 32,00 kWh/m²a, aplicando la envolvente y ventilación P6 (Tabla 3) con instalaciones I6 (Tabla 4), y tiene un coste de 30,20 €/m²a. Del lado opuesto, el más alto es de 239,80 kWh/m²a, y corresponde al estado actual (Tabla 3) con instalaciones I2 (Tabla 4). Tiene más consumo que el del caso de referencia, debido a las pérdidas en acumulación del ACS, frente a las calderas directas de gal actuales, y al peor coeficiente de paso de la electricidad frente al gas natural. Tiene un coste de 31,40 €/m²a.

En relación con las emisiones de CO₂, las más bajas son de 1,00 kg CO₂eq/m²a, y se obtienen de las cuatro combinaciones posibles entre las envolventes P4 y P6 (Tabla 3), y las instalaciones I4 e I5 (Tabla 4). Sus costes son, respectivamente: 32,40; 34,20; 22,10 y 23,90 €/m²a. Las emisiones de CO₂ más altas son las del caso de referencia.

El análisis de costes a 30 años indica que, el coste más bajo es de 18,30 €/m²a, y se obtiene combinando el estado actual (Tabla 3) con instalaciones I5 (Tabla 4). El coste más alto es de 42,20 €/m²a, y se obtiene combinando el estado actual (Tabla 3) con instalaciones I6 (Tabla 4).

IV. CONCLUSIONES

En este artículo se han descrito los trabajos realizados para el estudio de la rehabilitación energética a nivel de distrito de los barrios residenciales de Picoto, en Braga (Portugal), y de Adurtza, en Vitoria-Gasteiz (España), ambos vinculados al Proyecto IEA EBC Annex 75.

En ambos casos, se ha hecho un estudio de coste-efectividad a 30 años, para comparar los costes anuales a largo plazo e incluyendo inversiones, energía y mantenimiento de los edificios. Todo ello aplicado a distintas combinaciones de paquetes de mejoras en la envolvente térmica y nuevos sistemas de suministro energético, más eficientes y con energías renovables.

Los costes uniformes anuales equivalentes resultantes se han contrastado con indicadores energéticos como el consumo de energía primaria, y las emisiones de CO₂.

En el Barrio de Picoto, el coste anual más bajo se consigue combinando un paquete de medidas de mejora de aislamiento reducido con el sistema energético centralizado con bomba de calor; el consumo de energía primaria más bajo se consigue combinando un paquete de medidas de mejora de aislamiento medio con el sistema energético centralizado con bomba de calor y energía solar fotovoltaica; y las emisiones de CO₂ menores, casi nulas, se consiguen combinando cualquier paquete de medidas de mejora de envolvente con el sistema energético centralizado con caldera de biomasa.

En el Barrio de Adurtza, el coste anual más bajo se consigue añadiendo al estado actual un sistema energético de distrito con caldera de biomasa; el consumo de energía primaria más bajo

se consigue combinando el paquete de medidas de mejora de mayor aislamiento con el sistema energético de distrito con geotermia; y las emisiones de CO₂ menores se consiguen combinando los dos paquetes de medidas de mejora de mayor aislamiento con los sistemas energéticos centralizados por edificios y por distrito, ambos con caldera de biomasa.

Los resultados confirman la viabilidad técnica y económica de la rehabilitación. En ninguno de los barrios, el estado actual obtiene ni el mejor coste-efectividad, ni el menor consumo de energía primaria, ni las menores emisiones de CO₂.

Ha quedado validado este procedimiento para facilitar la toma de decisiones de los distintos agentes intervinientes en materia de renovaciones energéticas a nivel de barrio. Será interesante ampliar el número de medidas ensayadas para robustecer la base de datos de cada barrio, así como incorporar el Análisis de Ciclo de Vida de las medidas de mejora y de los sistemas energéticos propuestos.

El desempeño del Dr. Raúl Briones Llorente, Arquitecto Técnico e Ingeniero de Edificación, valida también el perfil de estas profesiones para colaborar en proyectos de investigación de esta magnitud, junto con otros profesionales de universidades y centros de investigación de distintos países

AGRADECIMIENTOS

El Dr. Raúl Briones Llorente, desea agradecer a la Dra. Manuela Almeida, al Dr. Ricardo Barbosa y al Dr. Ricardo Mateus, los tres de la Universidade do Minho (Portugal), y al Dr. Juan María Hidalgo Betanzos, de la Universidad del País Vasco UPV/EHU y el Laboratorio de Control de Calidad en la Edificación del Gobierno Vasco, el haberle permitido colaborar en el proyecto IEA EBC Annex 75 durante sendas estancias investigadoras, aunque la Universidad de Burgos no participase en dicho proyecto de investigación. Así mismo, desea expresar su agradecimiento al Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Burgos (COAATBU), al que pertenece, por el apoyo prestado para participar en el congreso CONTART 2024.

REFERENCIAS

- Barbosa R., Almeida M., Briones-Llorente R., y Mateus R. (2022). Environmental Performance of a Cost-Effective Energy Renovation at the Neighbourhood Scale – The Case for Social Housing in Braga, Portugal. *Sustainability*, 14(4), 1-16. <https://doi.org/10.3390/su14041947>
- Efinovatic. (2023). *SG SAVE*. (version 3.502) [software]. <http://www.efinovatic.es/energyPlus/>
- Global Buildings Performance Network GBPN (2013). *Buildings for Our Future: The Deep Path for Closing the Emissions Gap in the Building Sector*. <https://www.gbpn.org/buildings-for-our-future-the-deep-path-for-closing-the-emissions-gap-in-the-building-sector/>
- International Energy Agency (2017). *IEA EBC Annex 75 - Cost-effective Building Renovation at District Level Combining Energy Efficiency & Renewables*. <https://annex75.iea-ebc.org/>
- International Energy Agency (2019). *World Energy Statistics*.

https://www.oecd-ilibrary.org/energy/world-energy-statistics-2019_2e828dea-en

International Energy Agency (2023a). *Cost-effective building renovation strategies at the district level combining energy efficiency & renewables – Investigation based on parametric calculations with generic districts.*

https://annex75.iea-ebc.org/Data/publications/Annex75_B3%20Report_Generi cDistrictCalculations_18%20June%202023.pdf

International Energy Agency (2023b). *Investigation of cost-effective building renovation strategies at the district level combining energy efficiency & renewables – a case studies-based assessment.*

https://annex75.iea-ebc.org/Data/publications/Annex75_C2_Report_CaseStudies_20230707.pdf

Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana del Gobierno de España. (2022). *Documento Básico HE Ahorro de energía. Código Técnico de la Edificación.*

<https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/AhorroEnergia.html>

National Laboratory of the U.S. Department of Energy. (2023). *Open Studio.* (version 3.8.0) [software].

<https://www.openstudio.net/>

Terés-Zubiaga J., Bolliger R., Almeida M. G., Barbosa R., Rose J., Thomsen K. E., Montero E., y Briones-Llorente R. (2020). Cost-effective building renovation at district level combining energy efficiency & renewables – Methodology assessment proposed in IEA-Annex 75 and a demonstration case study. *Energy and Buildings*, 224, 1-12.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110280>

Trimble Inc. (2023). *SketchUp.* (version 2023) [software].

<https://www.sketchup.com/es>

United Nations (2015). *The 2030 Agenda for Sustainable Development.* <https://sdgs.un.org/2030agenda>



Reconocimiento – NoComercial (by-nc): Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.