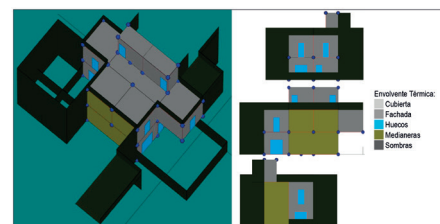


Transformación de las viviendas de la burbuja inmobiliaria en edificios de consumo energético casi nulo: estudio de casos



Transformation of residential housings from the real estate bubble into nearly-zero-energy buildings: case studies



Alberto Cerezo-Narváez, José M. Piñero-Vilela, Enrique A. Rodríguez-Jara, Manuel Otero-Mateo, Andrés Pastor-Fernández y Pablo Ballesteros-Pérez

Universidad de Cádiz. Escuela Superior de Ingeniería. Dpto. de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial. Avenida de la Universidad de Cádiz, 10 - 11519 Puerto Real, Cádiz (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9854> | Recibido: 14/07/2020 • Inicio Evaluación: 15/07/2020 • Aceptado: 14/10/2020

ABSTRACT

- Spanish residential buildings built during the real estate bubble (200-2009) complied with the Spanish Basic Building Standard on building thermal conditions NBE-CT-79. In 2006, the Basic Energy Saving Document of the Spanish Technical Building Code (CTE-DB-HE) came into effect. This code developed the Spanish Organic Law on Buildings 38/1999 and it was also much more restrictive. Recently, this regulatory framework has been updated by the Spanish Royal Decree 732/2019 on energy efficiency. This Royal Decree transposes European Directives 2010/31/EU, 2012/27/EU and 2018/844/EU on nearly-zero-energy consumption buildings (NZEB). In this paper, the energy, emissions and economic impact caused by this legislation change on a standard semi-detached house in the 153 cities of Andalusia is analyzed. In each location, the household's original thermal behavior with the compliant with current legislation is compared. The calculations are performed with HULC energy simulation tool and the European PVGIS climate data, considering the most adverse orientations. The house adaptation involves a partial modification of the envelope, the inclusion of solar-thermal energy for the domestic hot water supply (DHW) and photovoltaic energy to reduce electricity consumption. Results show that European objectives are largely exceeded. Energy savings vary between 81% and 146%, emissions improve between 71% and 128% and the electricity and natural gas bill is reduced between 67% and 123%.
- Keywords:** Spanish real estate bubble, energy efficiency, nearly-zero-energy building, thermal envelope, thermal insulation, solar-thermal energy, photovoltaic energy, technical building code, housing rehabilitation, Andalusia.

RESUMEN

Las edificaciones residenciales españolas construidas en la década de la burbuja inmobiliaria (2000-2009) debían cumplir la Norma Básica de la Edificación NBE-CT-79 sobre condiciones térmicas en los edificios. En 2006 entró en vigor el Documento Básico de Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación (CTE-DB-HE), el cual desarrollaba la Ley Orgánica de la Edificación (LOE) 38/1999, y era además mucho más restrictivo. Recientemente, este marco normativo ha sido actualizado en materia de energía por el Real Decreto 732/2019. Este Real Decreto transpone las directivas europeas 2010/31/UE, 2012/27/UE y 2018/844/UE en materia de eficiencia energética hacia edificios de consumo de energía casi nulo (EECN). En el presente trabajo se analiza el impacto energé-

tico, en emisiones y económico que tiene este cambio normativo en una vivienda unifamiliar adosada tipo en las 153 ciudades de Andalucía. En cada localidad se compara el comportamiento térmico de la vivienda original con el obtenido tras ser adaptada a la nueva normativa. Para ello se utiliza la herramienta de simulación energética HULC y los datos climáticos del sistema europeo PVGIS, estudiando las orientaciones más desfavorables. La adaptación de la vivienda se realiza modificando parcialmente la envolvente, incluyendo contribución solar-térmica para abastecimiento de agua caliente sanitaria (ACS) y fotovoltaica para reducir el consumo eléctrico. Los resultados muestran que se superan con creces los objetivos europeos. El ahorro energético varía entre un 81% y un 146%, las emisiones disminuyen de un 71% a un 128% y la factura se reduce entre un 67% y un 123%.

Palabras clave: burbuja inmobiliaria española, eficiencia energética, edificio de consumo energético casi nulo, envolvente térmica, aislamiento térmico, energía solar-térmica, energía fotovoltaica, código técnico de la edificación, rehabilitación de vivienda, Andalucía.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbano desde la "burbuja inmobiliaria" supuso en España y especialmente en Andalucía, una reducción drástica de la densidad edificatoria a menos de 35 viviendas por hectárea [1]. La legislación actual, lejos de restringir la expansión del crecimiento urbano ocupando suelo rural, lo ha fomentado desregulando el uso del suelo no urbanizable [2]. En este proceso de expansión urbano, ha destacado la proliferación de las viviendas unifamiliares, principalmente adosadas [3, 4]. La Figura 1 muestra el crecimiento de viviendas en las dos últimas décadas en Andalucía y España. Si bien la cantidad de viviendas unifamiliares se ha incrementado en España respecto del total en algo más del 10% (12% en Andalucía), el total actual de este tipo de viviendas es del 34,33% (38,68% en Andalucía), todavía bastante inferior a la media de la Unión Europea (UE) (en torno al 60%).

En la década 2000-2009, posterior a la entrada en vigor de la LOE-38/1999, se construyeron en España algo más de 4,5 millones de nuevas viviendas. De ellas, casi un millón fueron en Andalucía, siendo más de doscientas mil unifamiliares, aisladas (51%), pareadas (6%) o adosadas (43%). Sin embargo, en la última década (2010-2019) apenas se han construido seiscientas mil nuevas viviendas en España, de las que apenas cincuenta mil fueron unifamiliares en Andalucía (61% adosadas).

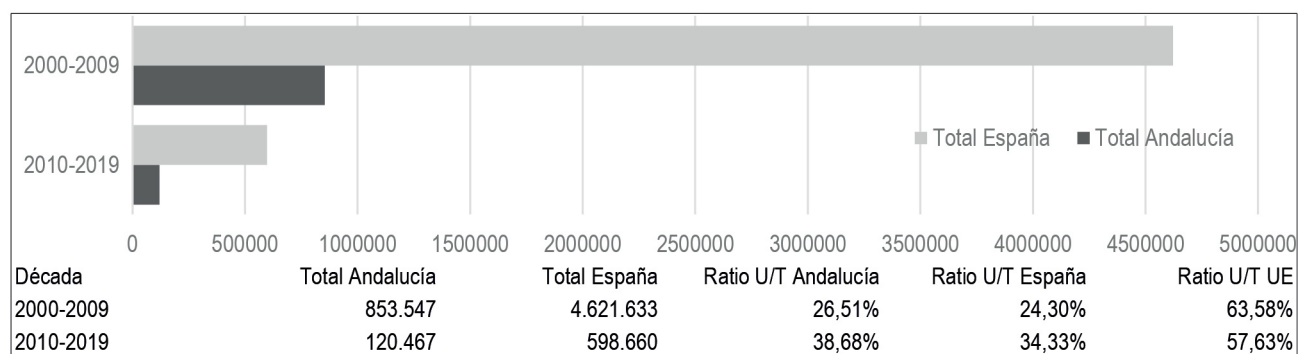


Figura 1. Viviendas de nueva construcción en Andalucía y España en 2000-2019.

Nota: T: Total viviendas, P: viviendas Plurifamiliares, U: viviendas Unifamiliares. Datos provenientes de EuroStat e INE.

En paralelo al desarrollo urbano desmedido, también ha crecido el precio de la energía [5]. Esto hace necesaria la aplicación de medidas encaminadas a reducir la demanda de los edificios y mejorar la eficiencia de sus sistemas y, por tanto, al ahorro de energía [6]. En la UE, los edificios son grandes consumidores de energía y materiales, pero también importantes productores de residuos y emisiones [7]. Estos aspectos son especialmente relevantes en las fases de construcción, uso y demolición. Por tanto, las viviendas enfrentan el desafío de gestionar mejor su energía, no solo para contribuir al crecimiento económico y bienestar social, sino también para asegurar la sostenibilidad de los recursos no renovables y preservar el medio natural [8]. Sin embargo, en el siglo XXI ha aumentado la pobreza energética de los hogares europeos [9, 10] y españoles [11, 12]. Esto se ha debido principalmente a la creciente incapacidad de soportar los costes derivados del uso de energía doméstica. Para invertir esta tendencia, además de intervenir los elevados precios de la energía y los bajos salarios, puede mejorarse la calidad constructiva de aquellas edificaciones con alto consumo energético, nuevas y/o ya existentes.

Las Directivas de Eficiencia Energética en Edificios (EPBD) han sido analizadas por la mayoría de los países europeos del sur (por ejemplo en Grecia [13], Italia [14], Portugal [15] y Turquía [16]). España no ha sido una excepción, tanto en sus climas fríos [17] como en los templados y cálidos [18]. En estos estudios, se contribuye a la definición de los edificios de consumo energético casi nulo (EECN). Este tipo de edificios mejoran la eficiencia energética y potencian el uso de energías renovables. España ha generado en los últimos años bastante normativa buscando mayor rendimiento energético y sostenibilidad para sus edificios. Cabe destacar la publicación del Código Técnico de la Edificación (CTE) en el RD-314/2006 como transposición de la Directiva 2002/91/CEE, que se aprobó con cuatro años de demora respecto de las exigencias de la LOE-38/1999. También señalar el procedimiento de Certificación Energética de Edificios (RD-235/2013), la transposición de la Directiva-2010/31/UE, el nuevo Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (RITE) (RD-238/2013), la transposición de la Directiva-2012/27/UE y la última versión del Documento Básico de Ahorro de Energía (CTE-DB-HE). Este se aprueba por medio del RD-732/2019, también con dos años de retraso, y modifica las condiciones para el control de la demanda energética. Concretamente, el CTE-DB-HE-19 transpone la Directiva-2018/844/UE, y limita aún más el consumo energético, incorporando por primera vez el concepto de EECN.

Pese a publicarse en 2006, la entrada en vigor del CTE se produjo a mediados de 2008 para aquellos edificios que solicitaron desde entonces la licencia de obras. No obstante, puesto que el plazo promedio de construcción de una vivienda se situaba cerca

de los 2 años [19], las últimas viviendas anteriores al CTE obtuvieron su certificación final de obra a partir de 2009. Por ello, la década considerada en este artículo abarca desde la entrada en vigor de la LOE-38/1999 hasta la aparición de las primeras viviendas bajo el marco normativo del CTE. En materia de eficiencia energética, estas viviendas construidas en la década 2000-2009, cumplen con la Norma Básica de la Edificación sobre Condiciones Térmicas en los Edificios (NBE-CT-79), obligatoria hasta la entrada en vigor del CTE. Asimismo, estas viviendas se rigen en materia estructural por la Norma Básica de la Edificación sobre Estructuras de Acero y/o Hormigón Estructural (NBE-EA-95, NBE-EHE-98 y siguientes). Estas normas establecían para cualquier edificio una vida útil de 50 años, extensibles a 75-100 años con el debido mantenimiento de su estructura (y un uso adecuado). Por tanto, estas viviendas todavía tienen entre 30-90 años de vida útil. Merece la pena analizar su comportamiento energético, de emisiones y económico durante este tiempo restante, así como valorar su posible intervención mediante la rehabilitación de su envolvente y/o utilización de energías renovables.

2. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es cuantificar el impacto energético (en consumo), medioambiental (en emisiones) y económico (ahorro contra inversión) de acometer una serie de intervenciones en una vivienda unifamiliar adosada tipo. Estas actuaciones incluyen modificaciones tanto en la envolvente térmica (para pasar de cumplir la NBE-CT-79 a cumplir el CTE-DB-HE-19) como en sus instalaciones (incorporando energías renovables solar-térmica (ST) y fotovoltaica (FV)). Por tanto, esta investigación ayuda a cuantificar la repercusión de acometer los cambios normativos producidos en España para alinearse con las EPBD en materia de EECN. Los escenarios y variantes propuestos son:

- 1) EB: Escenario base, vivienda original (según NBE-CT-79).
- 2) EB+ST: Vivienda original e instalación solar-térmica.
- 3) EB+FV: Vivienda original e instalación fotovoltaica (según RD-Ley 15/2018).
- 4) EB+ST+FV: Vivienda original, instalación solar-térmica e instalación fotovoltaica.
- 5) ER+ST: Rehabilitación de vivienda original (según CTE-DB-HE-19, que incluye implícita contribución solar-térmica).
- 6) ER+ST+FV: Rehabilitación de vivienda original (según CTE-DB-HE-19) e instalación fotovoltaica.

La vivienda objeto de estudio se localizará en las 153 ciudades de la comunidad autónoma de Andalucía (municipios andaluces con más de 10.000 habitantes). Las ciudades concentran más del 80% de la población (6.784.437 de los 8.414.240 totales a

31/12/2019). Además, también tienen unas condiciones climáticas menos severas que las localidades más pequeñas, al ser su altitud promedio de 245 metros frente a los 571 metros de los 632 pueblos andaluces. Este estudio, por tanto, es representativo de los núcleos urbanos andaluces, pues en él están representados además casi todas las zonas climáticas posibles, a pesar de que Andalucía es la comunidad autónoma con el clima más cálido en verano y menos frío en invierno de toda España peninsular [17, 18].

3. METODOLOGÍA

Mediante el estudio de casos, se analiza el comportamiento térmico de una: vivienda unifamiliar adosada en hilera, agrupándose simétricamente en laterales y fondo, construida durante los años 2000-2009. La vivienda tipo se ubica en todas las ciudades de Andalucía, y se simula con las orientaciones más desfavorables en invierno y en verano (norte para las demandas de calefacción (CAL), y oeste para refrigeración (REF) [20]).

Las viviendas construidas en plena burbuja inmobiliaria, anteriores a la vigencia del CTE, utilizaban el coeficiente de transmisión térmica global del edificio (K_g) de la NBE-CT-79. La última actualización del marco normativo de la CTE-DB-HE-19 reintroduce nuevamente un coeficiente global de transmisión de calor a través de la envolvente térmica del edificio (K_{LIM}). Por tanto, es posible comparar las configuraciones de la envolvente para dar

- cumplimiento a un coeficiente y a otro (ER frente a EB). Las etapas de este proceso son:
- Definición del espesor mínimo de la capa de aislamiento térmico de la envolvente, en función de las zonas climáticas (establecidas por la NBE-CT-79 o el CTE-DB-HE-19, según corresponda) de las 153 ciudades de Andalucía.
 - Estudio constructivo, económico y medioambiental de las intervenciones (rehabilitación) necesarias para adaptar la envolvente del estándar NBE-CT-79 al CTE-DB-HE-19, también según la correspondiente zona climática.
 - Generación del año meteorológico típico (TMY) para cada ciudad, en función de su latitud y longitud, según los datos del sistema europeo punto a punto PVGIS 2007-2016 [21].
 - Caracterización y dimensionamiento de las instalaciones de energía renovables incorporadas (ST y/o FV).
 - Simulación energética de los 1836 casos de estudio (6 escenarios en 2 orientaciones en 153 localizaciones).
 - Evaluación energética, de emisiones y económica de los 918 escenarios obtenidos (6 escenarios en 153 localizaciones).

3.1. DESCRIPCIÓN DE LA VIVIENDA

La vivienda unifamiliar tipo tiene una superficie construida de 147 m² (119 m² útiles). Consta de 2 plantas habitables, azotea transitable y patios delantero y trasero. Tiene 4 dormitorios, 3 baños, estar-comedor y cocina. La vivienda se muestra en la Figura 2, la

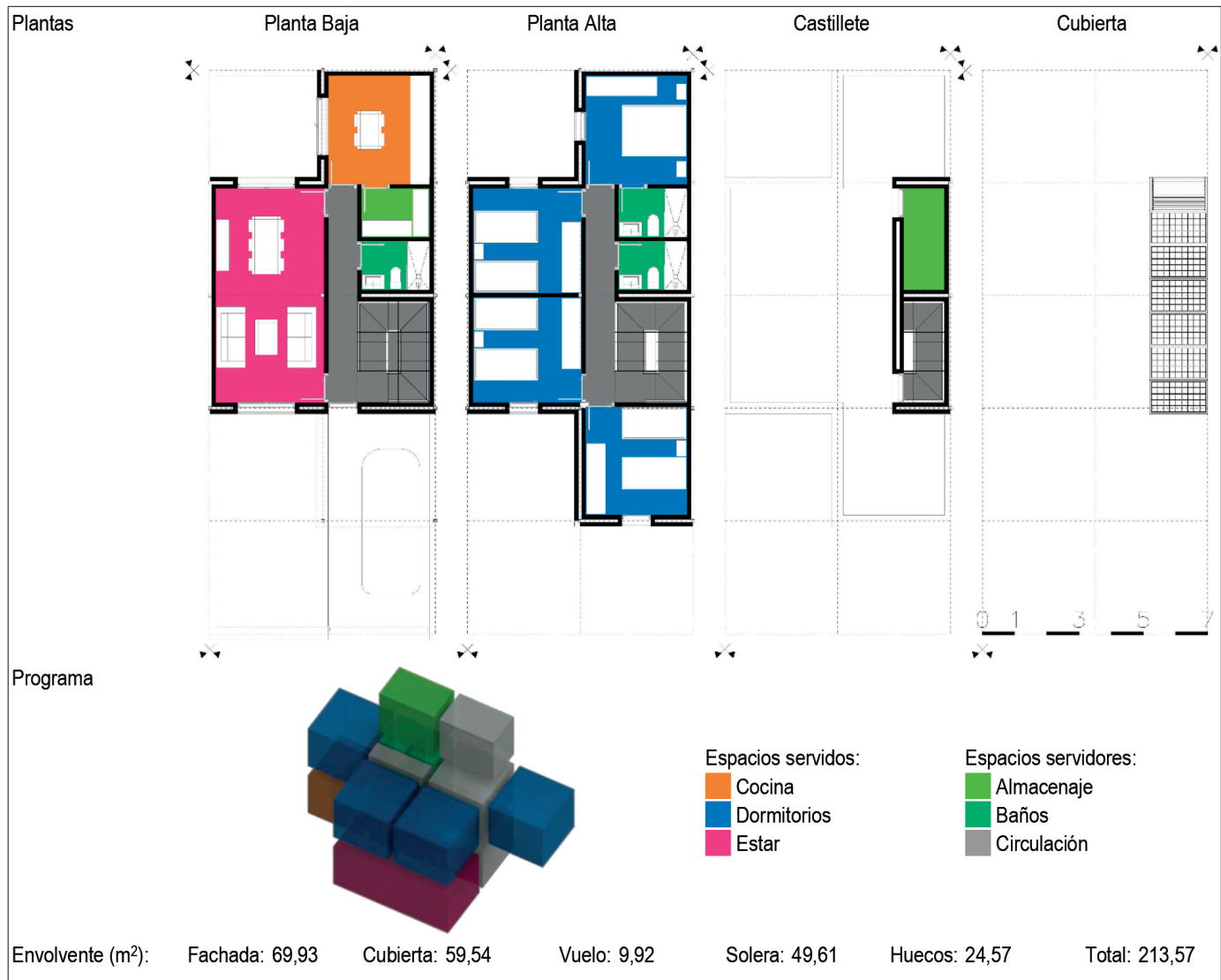


Figura 2: Descripción de la vivienda

cual incluye también las superficies de intercambio térmico a definir consideradas. El volumen de la vivienda es de 297,68 m³, tiene un factor de forma (envolvente/volumen según NBE-CT-79) de 0,7 y una compacidad (volumen/envolvente según CTE-DB-HE-19) de 1,4. Valores promedio de compacidad están entre 0,8 y 2,2 [22].

3.2. ENVOLVENTE TÉRMICA

Procede ahora caracterizar térmicamente la envolvente de la vivienda para cumplir con la normativa pasada o presente. El cálculo de los elementos que componen la envolvente térmica (envolvente en contacto con aire exterior: fachada, cubierta y voladizo, envolvente en contacto con terreno: solera) se caracterizan térmicamente a través de su transmitancia térmica (U), que se calculan según las directrices de la NBE-CT-79 y del CTE-DB-HE-19. En las Tablas A1-A4 del Material Suplementario se resumen las características de los componentes de la envolvente térmica (muro de fachada, suelo en voladizo, cubierta, solera sobre terreno), tanto para EB como para ER. Se incluyen y valoran también las obras auxiliares necesarias para pasar de la normativa pasada a la presente. Concretamente, para las definiciones constructivas se utiliza el programa de mediciones y presupuestos de obra Arquímedes de CYPE Ingenieros (versión 2020.f) [23]. Para facilitar la trazabilidad de todos los elementos constructivos en el banco de precios e impacto ambiental, se mantienen los mismos códigos alfanuméricos de los elementos.

El espesor de la capa de aislamiento PUR (E_M , E_S , E_C , E_T) se dimensiona en función del estándar de referencia y de la zona climática (ZC) correspondiente, tanto para el EB como para el ER. No obstante, la ZC puede variar para una misma localidad, de una norma a otra, generándose 12 combinaciones posibles: A-A y A-B, B-A, B-B y B-C, C-A, C-B, C-C y C-D, D-C, D-D y D-E. Tanto la NBE-CT-79 como el CTE-DB-HE-19 fijan los valores máximos de transmitancia U según tipo de cerramiento. Lo mismo ocurre con los coeficientes K_G y K_{LIM} . No obstante, el estándar NBE-CT-79 no

limita la transmitancia de los suelos en contacto con el terreno ni de los huecos (ventanas y puertas).

La Tabla 1 muestra la configuración de la envolvente para cada ZC, resolviendo el espesor de aislamiento para cada tipo de cerramiento que cumple con la transmitancia U y el coeficiente K, además de minimizar el volumen de aislamiento empleado. Al proceder así se garantiza cumplir la legislación con el mínimo aislamiento, optimizando el coste y también las emisiones. En relación con los huecos, se toman las transmitancias máximas permitidas por el CTE-DB-HE-19 para ambos escenarios (ver Tabla A5 del Material Suplementario).

3.3. SIMULACIÓN ENERGÉTICA

En España, para la certificación energética de edificios solo pueden utilizarse herramientas homologadas por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Existen dos alternativas de cálculo: la simplificada (con CE3, CE3X o CERMA) y la general (con CYPETHERM-HE-Plus, SG-SAVE o con la Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC) [24]). En esta investigación, la simulación de casos para la evaluación de la demanda de energía se realiza mediante HULC, también aprobada por el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana para la evaluación de consumos y emisiones de CO₂. Esta herramienta determina la demanda energética CAL/REF de cualquier edificio a partir de su definición geométrica, constructiva y operacional. HULC también incluye una interfaz gráfica para representación 3D del edificio, permitiendo simulaciones horarias.

La vivienda estudiada tiene un sistema de ventilación de caudal 33 l/s. De acuerdo con el CTE-DB-HS-3, esta ventilación alcanza una tasa de 0,4 renovaciones hora. La demanda de ACS es de 28 l/día por usuario, según el CTE-DB-HE-4. Puesto que se asumen 5 ocupantes, se utilizarán 140 l/día. Adicionalmente, siguiendo las indicaciones del CTE-DB-HE-0, se parte de una caldera de gas natural para la producción de calor y ACS con un rendimiento no-

EB (NBE-CT-79)	Cumplimiento Normativo (W/m ² ·K)						Configuración Envolvente (mm, W/m ² ·K)				
ZC	K_G max	U_{MB} max	U_{CB} max	U_{SB} max	U_{TB} max	U_{HB} max	E_{MB}	E_{CB}	E_{SB}	E_{TB}	U_{HB}
A _W *	1,538	1,8	1,4	1,0	—	—	0	0	15	0	2,7
A _W -A _X **	1,538	1,8-1,6	1,4-1,2	1,0-0,9	—	—	0	0	15	0	2,3
B _W -B _X *	1,011	1,8-1,6	1,4-1,2	1,0-0,9	—	—	5	0	20	0	2,7
B _W -B _X **	1,011	1,8-1,6	1,4-1,2	1,0-0,9	—	—	5	0	20	0	2,3
B _W -B _X ***	1,011	1,8-1,6	1,4-1,2	1,0-0,9	—	—	5	0	20	0	2,1
C _W *	0,747	1,8	1,4	1,0	—	—	15	15	25	10	2,7
C _W -C _X -C _Y **	0,747	1,8-1,6-1,4	1,4-1,2-0,9	1,0-0,9-0,8	—	—	15	15	25	10	2,3
C _W -C _X -C _Y ***	0,747	1,8-1,6-1,4	1,4-1,2-0,9	1,0-0,9-0,8	—	—	15	15	25	10	2,1
C _W -C _X -C _Y ****	0,747	1,8-1,6-1,4	1,4-1,2-0,9	1,0-0,9-0,8	—	—	15	15	25	10	1,8
D _X **	0,659	1,6	1,2	0,9	—	—	20	25	45	10	2,3
D _X -D _Y ***	0,659	1,6-1,4	1,2-0,9	0,9-0,8	—	—	20	25	45	10	2,1
D _X -D _Y ****	0,659	1,6-1,4	1,2-0,9	0,9-0,8	—	—	20	25	45	10	1,8
ER (CTE-DB-HE-19)	Cumplimiento Normativo (W/m ² ·K)						Configuración Envolvente (mm, W/m ² ·K)				
ZC	K_{LIM} max	U_{MR} max	U_{CR} max	U_{SR} max	U_{TR} max	U_{HR} max	E_{MR}	E_{CR}	E_{SR}	E_{TR}	U_{HR}
A ₃ -A ₄ *	0,6263	0,70	0,50	0,70	0,80	2,7	45	45	55	15	2,7
B ₃ -B ₄ **	0,6049	0,56	0,44	0,56	0,75	2,3	50	45	50	25	2,3
C ₂ -C ₃ -C ₄ ***	0,5549	0,49	0,40	0,49	0,70	2,1	65	55	70	25	2,1
D ₂ -D ₃ ****	0,5049	0,41	0,35	0,41	0,65	1,8	80	70	85	40	1,8
E ₁ ****	0,4549	0,37	0,33	0,37	0,59	1,8	100	100	100	65	1,8

Tabla 1: Caracterización de la envolvente térmica por ZC según NBE-CT-79, CTE-DB-HE-19.

Nota: Subíndices M: Muro de fachada, S: Suelo en voladizo, C: Cubierta, T: solera sobre Terreno, B: escenario Base, R: Rehabilitación.

mental de 0,92 y de un sistema de climatización para la producción de frío con un coeficiente de operación de 2,6.

Para estimar las intervenciones sobre el EB se pueden incluir un par de instalaciones a situar en cubierta en posición horizontal. La primera variante, incorporando una instalación ST que cubra 70–80% de la demanda de ACS. La segunda, una instalación FV con conexión a red que ayude a reducir el consumo eléctrico de la vivienda. El captador ST (1 de 2 m²) es de tubos de vacío con una eficiencia óptica del 78,6%, coeficiente global de pérdidas de 1,06 W/m²·K y 20 años de garantía. Los módulos FV (6 de 2 m²) son de células monocristalinas, con una potencia nominal de 400 W, temperatura de operación nominal de la célula (TONC) de 47°C, coeficiente de degradación por temperatura (δ) de 0,36%/°C y 30 años de garantía. Hay que puntualizar que la localización afecta a la radiación de la instalación FV, si bien la ST se ve además afectada por la temperatura del agua de la red de cada ciudad.

Una vez definidas la ubicación, orientación y renovación de aire, y caracterizados los sistemas ACS, ST y FV, se modeliza la vivienda para su simulación, como muestra la Figura 3. Con ello, se pueden obtener las demandas CAL/REF, ACS, contribución ST y aportación FV.

3.4. INVERSIÓN INICIAL

Tanto la mejora de la configuración arquitectónica como la incorporación de las instalaciones (ST, obligatoria según el CTE DB-HE4, y FV, opcional para usos residenciales) suponen una inversión económica y generan un impacto medioambiental inicial, cuyos retornos deben ser calculados. De acuerdo con el Eurocódigo ENV 1991-1, la NBE-EA-95 y la NBE-EHE-98, un edificio residencial debe tener una vida útil mínima de 50 años. Estas normas establecen un valor de vida útil que depende de la clase de exposición, tipo de cemento, resistencia característica, espesor de recubrimiento, condiciones de pintura, etc. No obstante, en función del buen uso y mantenimiento del edificio, como contempla el estándar internacional ISO 15686-2012, la vida útil puede prolongarse hasta los 75–100 años [25]. Por lo tanto, en el peor de los casos, la vida útil alcanzará el año 2050.

En términos económicos, los precios unitarios incluyen los siguientes costes asociados: gestión de residuos (GR), seguridad y salud (SyS), gastos generales (GG), beneficio industrial (BI), honorarios técnicos (HON), licencias municipales (impuesto a la construcción y tasa urbanística: IC+TU) e impuestos indirectos (IVA). Estos costes se resumen en la Tabla A6 del Material Suplementario, para cada escenario y variante contemplados.

En términos de impacto ambiental, se realiza un análisis del ciclo de vida de las partidas de obra necesarias para pasar de EB a ER (modificación de la envolvente térmica) e incorporar las instalaciones ST y FV. Esto se realiza mediante el cálculo del potencial de calentamiento global (PCG) midiendo las emisiones de CO₂ de estas intervenciones, como muestra la Tabla A7 (ver Material Suplementario).

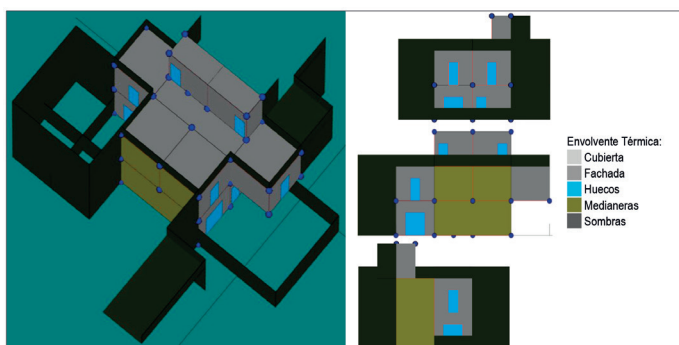


Figura 3: Modelo de simulación energética en HULC

Todos los costes y emisiones iniciales han de ser contrarrestados por una disminución del consumo energético durante el resto de la vida útil del edificio. Esto conduce a reducir la factura energética (electricidad y gas natural) e incluso compensar el excedente eléctrico, de acuerdo con las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo reguladas por el Real Decreto 244/2019, así como a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.

4. RESULTADOS

Si bien las construcciones originales datan de 2000 a 2009, dado que el estudio tiene lugar en 2020, tanto los resultados energéticos, en términos de consumo y de emisiones, como los económicos comprenden el período de 30 años 2021–2050.

4.1. BALANCE ENERGÉTICO

La Figura 4 resume los consumos anuales de los 6 escenarios e incluye su distribución en Andalucía. Las representaciones han utilizado la técnica de distancia inversa ponderada (IDW) del sistema de información geográfica ARCGIS de ESRI, a partir de los resultados de CAL, REF, ACS, ST y/o FV en cada una de las 153 ciudades. En el caso de la instalación ACS bajo el CTE-DB-HE-2019, sólo se incluye el consumo no renovable (en torno al 25% del total) tras descontar la contribución ST (aproximadamente el 75% según ubicación). La producción FV también se resta íntegra del consumo, bien por reducción bien por compensación y/o venta.

El EB presenta un consumo energético promedio de 66,39 kWh/m²·año (58,36 en gas natural para CAL y ACS y 8,03 en electricidad para REF). Si al EB se le incluye la instalación ST antes definida, el consumo se reduce de media un 29% hasta los 47,81 kWh/m²·año (39,78 en gas natural y 8,03 en electricidad). Si al EB se le incluye la instalación FV antes definida, el consumo se reduce de media un 45% hasta los 37,40 kWh/m²·año (consumo de 58,36 en gas natural y excedente eléctrico de 20,94). Además, si incluyen ambas ST y FV, la reducción promedio del consumo es de un 75%. El ER (con ST) reduce el consumo en un 66% hasta los 23,12 kWh/m²·año (18,80 en gas natural y 4,33 en electricidad). Si se le añade la FV, la reducción es del 112% hasta obtener un balance positivo con un exceso de producción de 5,87 kWh/m²·año (consumo de 18,80 en gas natural y excedente eléctrico de 24,66).

4.2. BALANCE EN EMISIONES

La Figura 5 resume las emisiones anuales de los escenarios contemplados en Andalucía, repercutiendo linealmente las emisiones iniciales de las intervenciones en los próximos 30 años de vida útil (2021–2050).

El EB genera unas emisiones de dióxido de carbono equivalente de 17,37 Kg CO₂eq/m²·año en promedio. En el EB+ST, las emisiones se reducen de media un 25% hasta los 13,17 Kg CO₂eq/m²·año. En el EB+FV, las emisiones se reducen un 48% hasta los 9,42 kg CO₂eq/m²·año. Si se optara por incluir ambas instalaciones (ST+FV), la reducción alcanzaría un 73% hasta los 5,22 kg CO₂eq/m²·año. Por otro lado, el ER (con ST) consigue reducir estas emisiones de media un 51% hasta los 8,62 kg CO₂eq/m²·año. Si a esta intervención se le añade la FV, el ahorro en emisiones se sitúa en el 99% hasta generar sólo 0,67 kg CO₂eq/m²·año, contribuyendo a la paliación del calentamiento global.

4.3. BALANCE ECONÓMICO

La Figura 6 resume el coste anual de la energía consumida de los escenarios contemplados, repercutiendo la inversión inicial

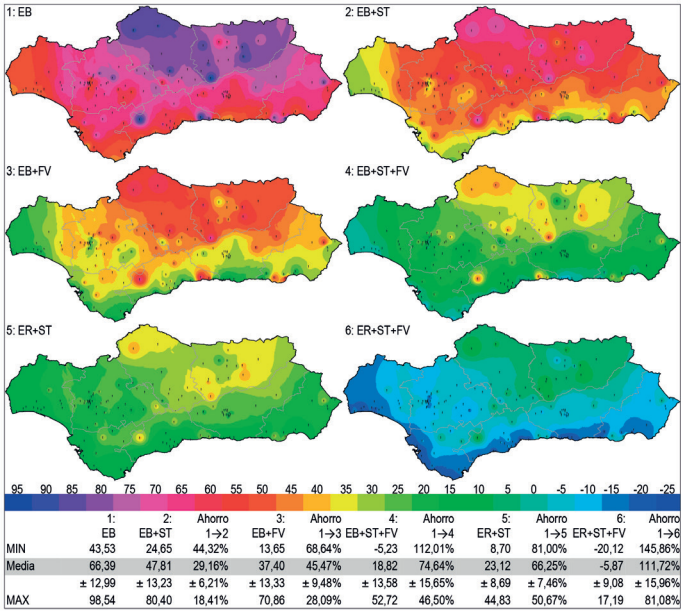


Figura 4: Consumos de energía anuales (en kWh/m²·año)

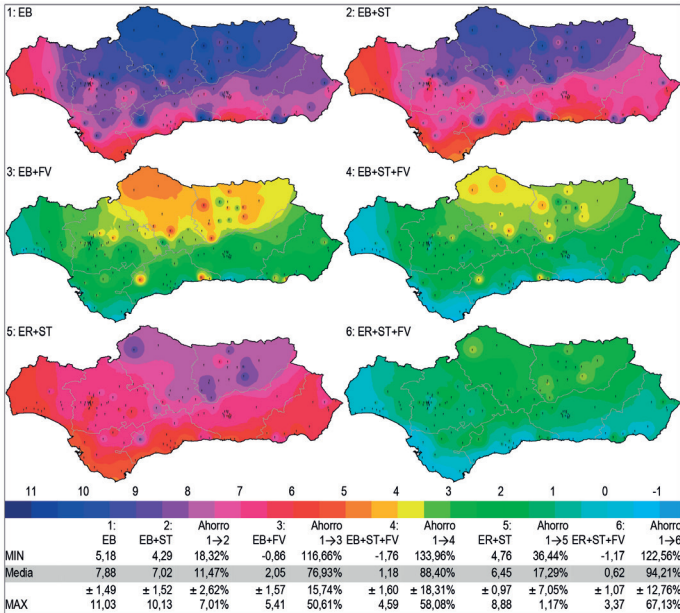


Figura 6: Costes anuales (en €/m²·año)

NOTA: Para el estudio económico se ha considerado el precio de la energía de acuerdo con los datos de España en Eurostat para consumidores domésticos: 0,2394 €/kWh para electricidad (REF, FV) y 0,1021 €/kWh para gas natural (CAL, ST)

como la FV, la reducción alcanzaría en promedio un 88% hasta los 1,18 €/m²·año. Por su parte, el ER con la instalación ST consigue reducir la factura un 17% hasta los 6,45 €/m²·año. Si se le añade la instalación FV, el ahorro económico se sitúa en el 94% hasta los 0,62 €/m²·año. Finalmente, para contrastar mejor la rentabilidad de cada escenario, se ha calculado el periodo de recuperación de las inversiones iniciales en la Tabla 2. Como puede observarse, todas las variantes propuestas se recuperan en todas las ciudades antes del fin más temprano posible de su vida útil.

6. CONCLUSIONES

El coste y la optimización del espacio exigen la disminución del material empleado en las construcciones actuales. Sin embargo, esta reducción afecta en gran medida la inercia térmica de la envolvente y puede hacerla insuficiente para amortiguar las oscilaciones de la temperatura exterior [26]. La optimización del espesor del aislamiento, maximizando su contribución a los coeficientes K_g de la NBE-CT-79 y K_{lim} del CTE-DB-HE-19 pero minimizando su volumen, desempeña un papel fundamental para alcanzar un compromiso entre el confort térmico, el coste de la construcción y el consumo de energía. Esto disminuirá tanto las emisiones derivadas como el coste a lo largo de la vida útil del edificio.

A nivel energético, se han considerado unos rendimientos normalizados de los sistemas para producción de frío, calor y ACS, y un material de aislamiento estandarizado, así como soluciones comerciales para las instalaciones ST y FV. En este contexto, el

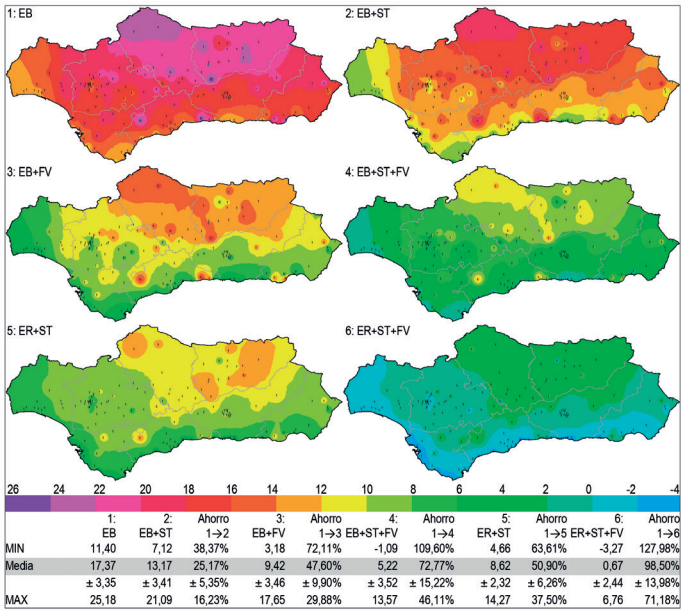


Figura 5: Emisiones anuales (en kg CO₂eq/m²·año)

NOTA: Para el estudio de emisiones se han considerado unos factores de paso de 0,331 kgCO₂/kWh para electricidad (REF y FV), y de 0,252 kgCO₂/kWh para gas natural (CAL y ST), de acuerdo con los datos extraídos de HULC

de las variantes propuestas en los próximos 30 años de vida útil (2021-2050) a lo largo de Andalucía.

En el EB se destinan 7,88 €/m²·año al pago de la factura energética. Si al EB se le incluye una instalación ST, el coste de la factura se reduce una media de un 11% hasta los 7,02 €/m²·año. Si al EB se le incluye una instalación FV, el coste se reduce de media un 77% hasta los 2,05 €/m²·año. Si se opta por incluir tanto la ST

	1 (EB) → 2 (EB+ST)	1 (EB) → 3 (EB+FV)	1 (EB) → 4 (EB+ST+FV)	1 (EB) → 5 (ER+ST)	1 (EB) → 6 (ER+ST+FV)
MIN	15,36 (5,01%)	4,54 (21,98%)	6,93 (14,16%)	13,80 (5,97%)	9,44 (9,98%)
Media	16,31 (4,50%)	4,78 (20,85%)	7,26 (13,48%)	21,78 (2,33%)	11,68 (7,65%)
	± 0,42 (±0,22%)	± 0,14 (±0,60%)	± 0,19 (±0,37%)	± 3,27 (1,15%)	± 0,76 (0,69%)
MAX	17,43 (3,94%)	5,26 (18,92%)	7,90 (12,26%)	29,47 (0,12%)	13,27 (6,34%)

Tabla 2: Periodo de recuperación (en años) y Tasa Interna de Retorno (TIR) (entre paréntesis) de los escenarios propuestos

ahorro energético obtenido supera con creces las directrices de las directivas EPBD-2002/91/CE (20% para 2020) y EPBD-2010/31/UE (27% para 2030). El ahorro anual, que puede llegar a oscilar entre el 81% y el 146%, supera el 100% en 117 de las 153 ciudades andaluzas. Estos excedentes eléctricos (24,66 kWh/m²·año en promedio) se pueden destinar a reducir el resto de la factura energética (electrodomésticos, iluminación, etc.) o incluso a la venta. De acuerdo con los datos facilitados por Red Eléctrica Española (REE) [27], este resto supone aproximadamente el 83% de la factura, unos 22,81 kWh/m²·año (considerando un consumo medio al año de 3.272 kWh por hogar).

A nivel de emisiones, se han considerado los factores de paso de emisiones de CO₂eq aprobados por la Comisión Permanente de Certificación Energética (reconocidos por el RITE e incorporados a HULC), tanto para electricidad como de gas natural. También se ha considerado uno contrastado para el aislamiento térmico PUR [20]. Análogamente, el balance anual de emisiones vuelve a superar sobradamente las directrices de las directivas EPBD-2002/91/CE (20% para 2020) y EPBD-2010/31/UE (40% para 2030) con un ahorro anual de entre el 71% y el 128%. Las ciudades en las que se obtiene un balance superior al 100% (60 de 153) generan emisiones por CAL y ST, pero dejan de emitir una cantidad mayor por REF, electrodomésticos, iluminación, etc.

A nivel económico, todos los escenarios recuperan la inversión en un período de tiempo inferior a los 30 años de vida útil, situándose el ahorro entre el 67% y el 123%. Las TIR obtenidas varían entre el 6% y el 10%, superiores a los costes de oportunidad habituales [28], que toman como tasa de descuento el coste de las obligaciones del Estado a 30 años.

En resumen, todas las combinaciones de rehabilitación estudiadas en las ciudades de Andalucía, incluso en climas suaves como los de Cádiz y Málaga [29], se encuentran en 2020 con la capacidad de retornar en términos energéticos, de emisiones y económicos, las inversiones derivadas de su implementación, mejorando notoriamente su situación. En consecuencia, se recomienda la adaptación del parque de viviendas unifamiliares construidas en la década 2000-2009 a la nueva normativa, transformándolas en edificios de consumo casi nulo.

REFERENCIAS

- [1] Pozueta J. "Rasgos urbanísticos del crecimiento residencial asociado a la burbuja inmobiliaria, 1995-2006". Cuadernos de Investigación Urbanística. 2015. Vol.100, p.87-94. DOI: <http://dx.doi.org/10.20868/ciur.2015.100.3170>.
- [2] Jiménez V, Hidalgo R, Campesino AJ, Alvarado V. "Normalización del modelo neoliberal de expansión residencial más allá del límite urbano en Chile y España". EURE. 2018. Vol.44-132, p.27-46. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/s0250-71612018000200027>.
- [3] Catalán B, Sauri D, Serra P. "Urban sprawl in the Mediterranean?". Landscape and Urban Planning. 2008. Vol.85-3-4, p.174-184. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.11.004>.
- [4] Gil F, Bayona J, Pujadas, I. "From boom to crash: Spanish urban areas in a decade of change (2001-2011)". European Urban and Regional Studies. 2013. Vol.23-2, p.198-216. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/0969776413498762>.
- [5] Faiella I, Mistretta A. Energy costs and competitiveness in Europe. Rome: Bank of Italy, 2018.
- [6] Merini I, Molina A, García MS, Ahachad M. Energy Efficiency Regulation and Requirements: Comparison Between Morocco and Spain. En: AI2SD 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham:Springer, 2019. p.197-209. ISBN:9783030118839. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-11884-6>.
- [7] Lolli N, Hestnes, AG. "The influence of different electricity-to-emissions conversion factors on the choice of insulation materials". Energy and Buildings. 2014. Vol.85, p.362-373. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.042>.
- [8] Duarte R, Sánchez J, Sarasa C. "Consumer-side actions in a low-carbon economy: A dynamic CGE analysis for Spain". Energy Policy. 2018. Vol.118, p.199-210. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2018.03.065>.
- [9] Thomson H, Bouzarovski S, Snell C. "Rethinking the measurement of energy poverty in Europe: A critical analysis of indicators and data". Indoor and Built Environment. 2017. Vol.26-7, p.879-901. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/1420326X17699260>.
- [10] Bollino CA, y Botti F. "Energy Poverty in Europe: A Multidimensional Approach". PSL Quarterly Review. 2017. Vol.70-283, p.473-507. DOI: http://dx.doi.org/10.13133/2037-3643_70.283_4.
- [11] Tirado S, López JL, Martín P, Mediavilla L. Pobreza energética en España. Potencial

de generación de empleo derivado de la rehabilitación energética de viviendas. Madrid:ACA, 2012.

- [12] Aristondo O, Onaindia E. "Counting energy poverty in Spain between 2004 and 2015". Energy Policy. 2017. Vol.113, p.420-429. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.027>.
- [13] Gaglia AG, Tsikaloudaki, AG, Laskos CM, Dialynas EN, Argiriou AA. "The impact of the energy performance regulations' updated on the construction technology, economics and energy aspects of new residential buildings: The case of Greece". Energy and Buildings. 2017. Vol. 155, p.225-237. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.008>.
- [14] Salvalai G, Masera G, Sesana MM. "Italian local codes for energy efficiency of buildings: Theoretical definition and experimental application to a residential case study". Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 42, p.1245-1259. DOI: <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.038>.
- [15] Magalhães SMC, Leal VMS. "Characterization of thermal performance and nominal heating gap of the residential building stock using the EPBD-derived databases: The case of Portugal mainland". Energy and Buildings. 2014. Vol.70, p.167-179. DOI: <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.054>.
- [16] Kalaycioğlu E, Yilmaz AZ. "A new approach for the application of nearly zero energy concept at district level to reach EPBD recast requirements through a case study in Turkey". Energy and Buildings. 2017. Vol.152, p.680-700. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.040>.
- [17] López LM, Las Heras J, López LM, García C. "Environmental and energy impact of the EPBD in residential buildings in cold Mediterranean zones: The case of Spain". Energy and Buildings. 2017. Vol.150, p.567-582. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.023>.
- [18] López LM, Las Heras J, López LM, Olasolo P. "Environmental and energy impact of the EPBD in residential buildings in hot and temperate Mediterranean zones: The case of Spain". Energy. 2018. Vol.161, p.618-634. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.104>.
- [19] Fuentes D. "Una nota sobre el exceso de oferta de viviendas y la duración del ajuste del sector". Boletín económico de ICE. 2009. Vol.2958, p.15-24. ISSN:0214-8307.
- [20] Bastante MJ, Cerezo A, Piñero JM, Pastor A. "Determination of the Insulation Solution that Leads to Lower CO₂ Emissions during the Construction Phase of a Building". Energies. 2019. Vol.12-12, p.2400. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en12122400>.
- [21] Huld T, Müller R, Gambardella A. "A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa". Solar Energy. 2012. Vol.86-6, p.1803-1815. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.03.006>.
- [22] Esteves A, Esteves MJ, Mercado MV, Barea G, Gelardi D. "Building shape that promotes sustainable architecture. Evaluation of the indicative factors and its relation with the construction costs". Architecture Research. 2018. Vol.8-4, p.111-122. DOI: <http://dx.doi.org/10.5923/j.arch.20180804.01>.
- [23] CYPE Ingenieros. Arquimedes 2020.f. Alicante:CYPE Ingenieros, 2020.
- [24] Gobierno de España. Herramienta Unificada LIDER CALENER (HULC) 2.0.1960.1156. Madrid:Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020.
- [25] International Organization for Standardization. ISO 15686-2 Buildings and constructed assets. Service life planning. Part 2:Service life prediction procedures. Ginebra:ISO, 2012.
- [26] Laaouatni A, Martaj N, Bennacer R, Lachi M, El Omari M, El Ganaoui M. "Thermal building control using active ventilated block integrating phase change material". Energy and Buildings. 2019. Vol.187, p.50-63. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.024>.
- [27] Red Eléctrica Española. Cómo consumimos electricidad [en línea]. <<https://tinyurl.com/yadylxnc>> [Consulta:13 julio 2020].
- [28] European Commission. Guide to Cost-benefit Analysis of Investment Projects: Economic appraisal tool for Cohesion Policy 2014-2020. Bruselas:UE, 2014. ISBN:9789279347962.
- [29] Ballesteros P, Rojas YA, Hughes W, Shabnam K, Pellicer E, Mora D, Del Campo ML. "Weather-wise: A weather-aware planning tool for improving construction productivity and dealing with claims". Automation in Construction. 2017. Vol.84, p.81-95. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.022>.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Grupo de Investigación TEP 955-Ingeniería y Tecnología para la Prevención de Riesgos Laborales la ayuda recibida. Asimismo, el sexto autor agradece la financiación recibida por el Ministerio de Ciencia e Innovación por su contrato Ramón y Cajal (RYC-2017-22222) cofinanciado por el Fondo Social Europeo.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

La definición constructiva de la envolvente térmica, incluyendo la caracterización térmica de los huecos y el desglose de los costes y emisiones de las actuaciones iniciales se presentan como material suplementario.

https://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/9854-1.pdf

