

(05-032) - Comparison of Energy Solutions within the Framework of the Nearly Zero-Energy Building Proposed in the Technical Building Code

Cerezo-Narváez, Alberto ¹; Monge Palma, Rafael ²; Ruda Sarria, Francisco ²; Palomo Amores, Teresa Rocío ²; Guerrero Delgado, Mcarmen ²

¹ Universidad de Cádiz, ² Universidad de Sevilla

In Spain, the regulatory evolution in energy efficiency, from the Basic Building Standard on Thermal Conditions (NBE CT-79) to the versions of the Technical Building Code for Energy Savings (CTE-HE) transposing successive European directives (EPBD), demonstrates an increasing commitment to efficiency and sustainability in construction. Each version has integrated new requirements, moving towards more efficient and sustainable buildings. The editions of the CTE-HE have significantly reduced heating demands and, to a lesser extent, cooling demands. Since the demand for Domestic Hot Water (DHW) has remained constant, its relative importance has increased. This study analyzes the positioning of energy technologies that meet regulatory requirements in a competitive manner, examining 52 combinations of individual or collective installations, in the 12 climatic zones of mainland Spain, for heating, cooling, and/or DHW, in the reference buildings of the International Energy Agency. This analysis has identified solutions for each energy vector, considering seasonal performance and minimums of renewability. The results indicate that the majority of nearly zero-energy consumption buildings (NZEB) achieve class A efficiency, suggesting an adaptation of the scale. Moreover, the verification of DHW renewability excludes some energy installations that were previously valid.

Keywords: Energy Efficiency; Nearly Zero-Energy Building; Technical Building Code; Sustainability in Construction; Energy Technologies; Domestic Hot Water.

Comparación de soluciones energéticas en el marco del Edificio de Consumo Casi Nulo propuesto en el Código Técnico de Edificación

En España, la evolución normativa en eficiencia energética, desde la Norma Básica de Edificación sobre Condiciones Térmicas (NBE CT-79) hasta las versiones del Código Técnico de Edificación en Ahorro Energético (CTE-HE) trasponiendo las sucesivas directivas europeas (EPBD), demuestra un compromiso creciente con la eficiencia y sostenibilidad en edificación. Cada versión ha integrado nuevos requisitos, avanzando hacia edificaciones más eficientes y sostenibles. Las ediciones del CTE-HE han reducido significativamente las demandas de calefacción y, en menor medida, de refrigeración. Dado que la demanda de agua caliente sanitaria (ACS) se ha mantenido constante, su importancia relativa ha aumentado. Este estudio analiza el posicionamiento de tecnologías energéticas que cumplen normativamente de forma competitiva, examinando 52 combinaciones de instalaciones individuales o colectivas, en las 12 zonas climáticas de la España peninsular, para calefacción, refrigeración y/o ACS, en los edificios de referencia de la Agencia Internacional de la Energía. Este análisis ha identificado soluciones para cada vector energético, considerando prestaciones estacionales y mínimos de renovabilidad. Los resultados indican que la mayoría de edificios de consumo casi nulo (ECCN) alcanzan eficiencia clase A, sugiriendo una adaptación de la escala. Además, la verificación de renovabilidad del ACS excluye algunas instalaciones energéticas, anteriormente válidas.



©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Palabras clave: Eficiencia Energética; Edificio de Consumo Casi Nulo; Código Técnico de Edificación; Sostenibilidad en Construcción; Tecnologías Energéticas; Agua Caliente Sanitaria.

Correspondencia: alberto.cerezo@uca.es

Agradecimientos: This study has been funded by the projects "CONSTANCY - Resilient urbanisation methodologies and natural conditioning using imaginative nature-based solutions and cultural heritage to recover the street life" (Grant Agreement PID2020-118972RB-I00) and "NATURBEAM - Lighting the way to a greener future to restore urban habitability through nature-based solutions" (Grant Agreement TED2021-130416B-I00) by the Spanish Ministry of Science and Innovation. The second author is supported by the Spanish Ministry of Science, Innovation and Universities through a PhD grant agreement FPU21/0261. The third author is also financed for the development of the "INVESTIGO Program" (Activity: C23.I1.P03.S01.01 ANDALUSIA) with funds from the "Recovery and Resilience Mechanism".

1. Introducción

Los edificios son responsables de aproximadamente el 40% del consumo de energía de la Unión Europea (UE) y el 36% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), lo que significa que son los mayores consumidores de energía en Europa (European Union, 2021). Entre ellos, el parque residencial de la UE ofrece un alto potencial para lograr ganancias en eficiencia energética y reducción de emisiones de GEI (Uihlein y Eder, 2010). Esto se debe a la gran dependencia de los combustibles fósiles en actividades domésticas para cubrir la demanda de calefacción y agua caliente sanitaria (ACS) (Nejat et al., 2015), así como en menor medida e indirectamente, para refrigeración e iluminación (Barthelmes et al., 2016), aunque esta última instalación queda fuera de alcance para el parque edificatorio residencial. Buscando un futuro de cero energía y emisiones, el marco legal europeo se ha vuelto más estricto a lo largo de los años, así como el marco español al trasponerlo. En este sentido, cada Directiva de Eficiencia Energética de Edificios (Energy Performance Building Directive, EPBD) ha tenido como objetivo asegurar progresivamente el cumplimiento de los objetivos de la UE relacionados con las emisiones de GEI, el consumo de energía, la eficiencia energética y la generación de energía a partir de fuentes renovables en edificios.

La primera versión de la EPBD 2002/91/EC (European Union, 2003) proporcionó requisitos de uso de energía para edificios nuevos y existentes bajo rehabilitación e introdujo los certificados de eficiencia energética. A continuación, la EPBD 2010/31/EU (European Union, 2010) especificó que, para finales de 2020, todos los edificios nuevos deben ser edificios de consumo de energía casi nulo (EECN). Después, la EPBD 2012/27/EU (European Union, 2012) impuso un requisito obligatorio para que los Estados miembros desarrollasen planes nacionales para aumentar el número de EECN, de manera que se reflejasen las condiciones nacionales, regionales y/o locales, incluyendo un indicador numérico del uso de energía primaria. Posteriormente, la EPBD 2018/844/EU (European Union, 2018) modificó las dos directivas anteriores, enfatizando el compromiso de la UE en la lucha contra el cambio climático y la pobreza energética. Finalmente, la EPBD 2023/1791 (European Union, 2023) pretende incrementar el objetivo de descarbonización regional para el año 2030, reduciendo de forma progresiva la dependencia de la UE hacia los combustibles fósiles, mediante un uso de la energía mucho más eficiente. Para hacer esto, la UE establece como objetivos primarios:

- Descarbonizar el parque de viviendas, renovándolo desde un punto de vista energético.
- Asegurar el acceso igualitario a la financiación para la rehabilitación de edificios, recompensando propuestas que promuevan la eficiencia energética.
- Garantizar la calidad de los edificios, priorizando la adopción de soluciones naturales, el fomento de instalaciones alternativas de alta eficiencia, la promoción de la investigación y la prueba de nuevas soluciones.

Según las EPBD, los Estados miembros deben promover la mejora de la eficiencia energética de los edificios dentro de la UE, teniendo en cuenta las condiciones climáticas exteriores y locales, así como los requisitos del clima interior y la rentabilidad de las intervenciones de mejora (European Union, 2018). Para ello, las EPBD establecen objetivos de sostenibilidad para mitigar el cambio climático, reducir las emisiones de GEI, el consumo de energía y promulgar la contribución de la energía renovable. El propósito final ha pasado de reducir los GEI en la UE en un 80-95% en comparación con 1990 a conseguir la neutralidad climática en 2050, para asegurar un parque de edificios europeos altamente eficiente en energía y descarbonizado y facilitar la transformación de los edificios existentes en EECN. A corto plazo, para 2020, la UE estableció el objetivo de una reducción del 20% en las emisiones de GEI y en el consumo de energía y una contribución del 20% de la energía renovable, en comparación con los resultados de 1990. A medio plazo, para 2030, establece una reducción del 55% en las emisiones de GEI (respecto del 40% previsto inicialmente), y del 42.5% en el consumo de energía (respecto del 32.5% previsto inicialmente).

En España, se han publicado muchos estándares, regulaciones y leyes este siglo, con el objetivo de lograr una mayor eficiencia energética y sostenibilidad para los edificios. La Ley de Ordenación de la Edificación (LOE) 38/1999 (Gobierno de España, 1999) requirió la adopción de un Código Técnico de la Edificación (CTE), que entró en vigor en 2008 por el Real Decreto 384/2006 (Gobierno de España, 2006). Esto transpuso la EPBD 2002/91/EC y derogó definitivamente la Norma Básica de la Edificación sobre Condiciones Térmicas en los edificios (NBE CT-79) (Gobierno de España, 1979). Después de eso, algunos Reales Decretos (RD 1371/2007, RD 238/2013) y Órdenes Ministeriales (VIV 984/2009, FOM 1635/2013, FOM 588/2017) transpusieron las EPBD 2010/31/EU y 2012/27EU, enfocándose en el procesamiento de certificaciones energéticas, la regulación de instalaciones térmicas, la actualización de demandas energéticas y la limitación del consumo de energía. Más adelante, el Real Decreto 244/2019 (Gobierno de España, 2019) reguló las condiciones para el autoconsumo de electricidad, eliminando el "impuesto al sol" e incluso permitiendo la venta de excedentes de pequeños productores, para plantas de generación de menos de 100 kWp. Además, en el mismo año, el Real Decreto 732/2019 (Gobierno de España, 2019b) modificó una vez más el CTE, aumentando las condiciones para controlar la demanda energética y limitando el consumo de energía. Esta última versión incorporó las consideraciones de la EPBD 2018/844/EU, con el propósito de reducir la energía requerida para satisfacer la demanda energética asociada con el uso de edificios, incorporando eventualmente la definición de un EECN para España. A continuación, el Real Decreto 450/2022 (Gobierno de España, 2022) ha comenzado a regular la generación mínima de energía eléctrica procedente de fuentes renovables de los edificios de nueva construcción, ampliación de edificios existentes y a edificios con una reforma integral con una superficie mayor a 1.000 metros cuadrados, lo que afecta principalmente a las viviendas plurifamiliares. Finalmente, queda pendiente la trasposición de la EPBD 2023/1791 al marco normativo legal nacional.

Cada versión normativa española ha ido integrando nuevos requisitos de la UE, avanzando hacia edificaciones más eficientes y sostenibles. Las sucesivas ediciones del CTE en materia de ahorro energético (HE) han ido reduciendo significativamente las demandas de calefacción y, en menor medida, también las de refrigeración, en parte debido a la incidencia del cambio climático (Matthews et al., 2017) y, en entornos urbanos, al efecto de isla de calor (UHI) (Marando et al., 2022). Por el contrario, dado que la demanda de agua caliente sanitaria (ACS) se ha mantenido constante, su importancia relativa respecto de demandas y consumos ha ido aumentando considerablemente.

2. Objetivos

El objetivo de la comunicación es el diseño conceptual y desarrollo de una solución informática VBA, de aplicación en herramientas para la creación, manejo y modificación de hojas de cálculo tipo Excel, que muestre la situación de las distintas soluciones energéticas para edificios de nueva construcción que pueden utilizarse para atender las demandas de calefacción, refrigeración y/o ACS en el marco del CTE, tras la implantación de los EECN, analizando su posicionamiento. Este estudio se ha de extender a las 12 zonas climáticas de la España Peninsular, tanto cálidas como frías, y aplicarse tanto en viviendas plurifamiliares como viviendas unifamiliares. La aplicación ha de permitir comprobar el cumplimiento de los parámetros definidos en el Documento Básico de Ahorro de Energía (HE): coeficiente global de transmisión de calor a través de la envolvente térmica del edificio ($K_{límite}$), consumo de energía primaria total y de energía primaria no renovable, fracción de energías renovables para la producción de ACS, así como también debe mostrar la inversión inicial necesaria para el promotor (CAPEX), el coste de operación para el usuario (OPEX), la calificación energética obtenida por la vivienda o el edificio de viviendas, y el vector o vectores energéticos empleados, según se satisfagan las demandas de calefacción, refrigeración y/o ACS.

3. Metodología

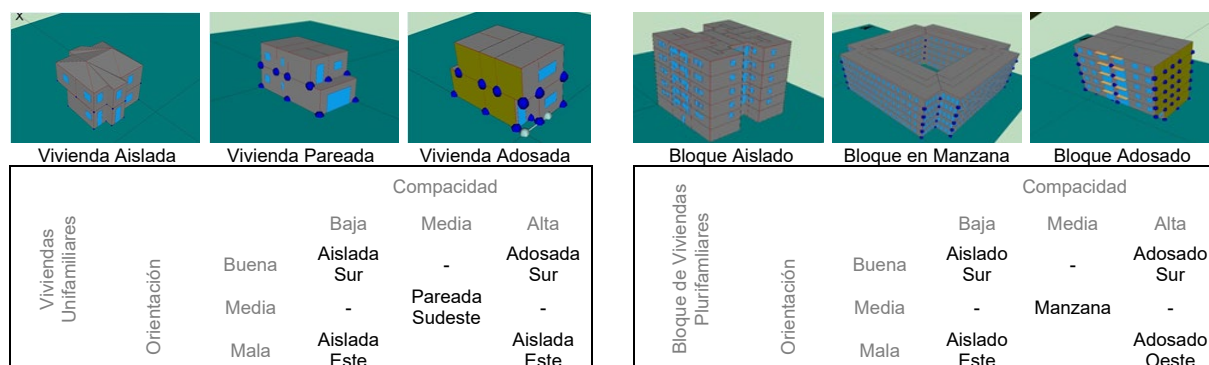
El método consta de una serie de etapas para obtener, en diferentes edificios y zonas climáticas, paquetes de soluciones (envuelta e instalaciones: calefacción, refrigeración y/o ACS), que permitan verificar el cumplimiento del CTE-HE 2019 en condiciones competitivas (coste/beneficio), identificando en cada caso la posición de las distintas soluciones según vector energético para tomar decisiones rápidas y precisas al seleccionar las tecnologías más convenientes:

1. Selección de edificios y modelado geométrico de los mismos en la herramienta unificada Lider-Calener (HULC).
2. Catálogo de medidas de mejora de la envolvente para alcanzar en cada combinación los requisitos estrictos y reforzados correspondientes a los indicadores del CTE-HE1.
3. Confección de una base de datos de prestaciones y precios del catálogo de medidas de la envolvente e instalaciones de producción de calor y frío.
4. Desarrollo de un sistema de generación automática de ficheros de definición de las combinaciones anteriores., de un programa específico de pasadas masivas, utilizando el motor de cálculo de HULC, para la simulación energética de las combinaciones posibles, y de un programa de gestión de ficheros de resultados y ejecución en tanda de la combinatoria definida (resultados energéticos).
5. Exportación de resultados energéticos a hoja de datos y ejecución en tanda del software de postproceso.
6. Implementación de hoja de datos para la obtención de resultados económicos y filtrado de los mismos, dependiendo de una función objetivo multicriterio.
7. Presentación de resultados técnico-económicos mediante herramienta: visor NORBA.

3.1 Selección de edificios

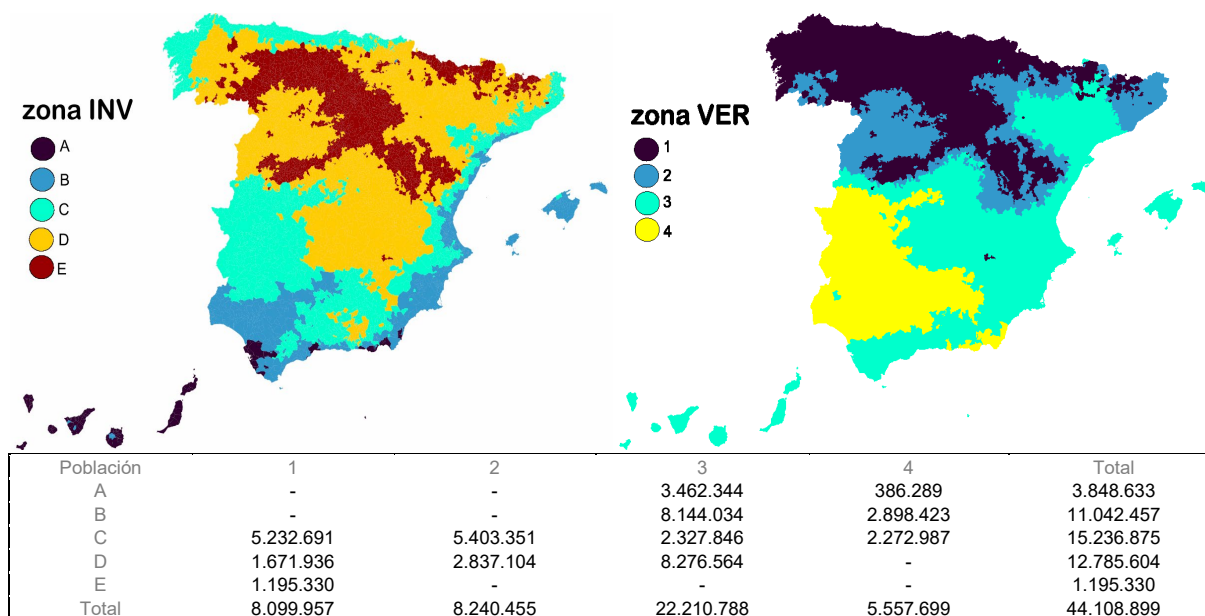
Los edificios residenciales sobre los que realizar el estudio resultan los 6 edificios propuestos por la Agencia Internacional de la Energía para la realización de los test de validación de los motores de cálculo reconocidos. Esta información se pone a disposición del público por el Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, a través de la Secretaría de Estado de Energía. El parque edificatorio incluye 3 tipologías de vivienda plurifamiliar (bloque aislado, entre medianeras y en manzana) y otras 3 tipologías de vivienda unifamiliar (aislada, adosada y pareada), que dan como resultado 10 casos, tal y como se resume en la Figura 1.

Figura 1: Selección de Edificios y Modelado Geométrico en la HULC



Asimismo, se tienen en consideración todas las zonas climáticas de España peninsular, mostradas en la Figura 2, las cuales se dividen de acuerdo con las severidades climáticas de invierno y verano. La severidad climática depende de los grados-día en base 20, del número de horas de sol y del número de horas de sol máximas. Para invierno, de los meses que van desde octubre a mayo. Para verano, de los meses que van de junio a septiembre.

Figura 2: Zonas Climáticas de España



3.2 Mejora de la envolvente

Las medidas de mejora de la envolvente pasan por seleccionar unas características constructivas que sean conformes con las exigencias del CTE-HE1. La conformidad con las exigencias de calefacción se materializa en dos escenarios: Por un lado, dando cumplimiento estricto del valor de $K_{\text{límite}}$ definido en el CTE-HE1. Por otro lado, dando cumplimiento reforzado del $K_{\text{límite}}$, de forma que se obtenga un valor un 20% inferior al de la norma. Asimismo, para las exigencias de refrigeración también se tienen dos consideraciones: Por un lado, el parámetro de control solar, obtenido como relación entre las ganancias solares para el mes de julio, considerando activadas las protecciones solares móviles. Por el otro, la superficie útil que, para edificios residenciales, resulta en un valor de 2 kWh/m²·mes.

En relación con el procedimiento de obtención de las calidades constructivas de la envolvente, existen numerosas soluciones posibles que cumplen el $K_{\text{límite}}$ variando, por un lado, las transmitancias de muros, cubiertas, suelos y ventanas y, por el otro, las transmitancias lineales de los puentes térmicos. Para limitar el número de casos se definen paquetes de soluciones interconsistentes, para que no aparezcan combinaciones inverosímiles o poco probables. Los paquetes comprenden 3 combinaciones para las transmitancias de la envolvente (dependientes de la zona climática) y otras 3 combinaciones para las transmitancias lineales de los puentes térmicos. La búsqueda de la solución que permite verificar la exigencia del $K_{\text{límite}}$ es un paquete obtenido mediante interpolación entre los paquetes anteriores.

El primero de los paquetes de soluciones de envolvente se corresponde con los valores mínimos incluidos en la norma CTE-HE1. Además, el segundo se corresponde con los valores recomendados incluidos en el anexo de la misma norma. Finalmente, el tercero de los paquetes se establece definiendo un límite correspondiente a una solución de alta eficiencia, obtenido de la combinación que origina el coste óptimo, tal y como muestra la Figura 3. Asimismo, la Tabla 1 muestra las transmitancias para cada zona climática según elemento de la envolvente (muros, cubiertas, suelos y ventanas). Para los definición de los puentes térmicos lineales (TTL), se toman los tres paquetes que se incluyen en la Tabla 2. La búsqueda de las combinaciones se realiza mediante un algoritmo que gestiona las 9 soluciones pivote y sus interpolaciones de forma que se minimice el coste de la solución priorizando la mejora la transmitancia de los elementos de la envuelta sobre la mejora de la transmitancia lineal de los puentes térmicos.

Figura 3: Selección de combinación de alta eficiencia mediante el método de coste óptimo

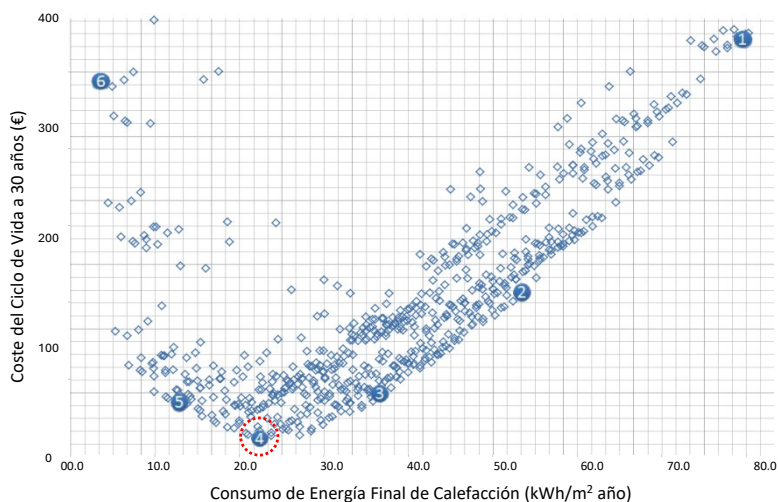


Tabla 1: Transmitancias de la envolvente térmica de los edificios según zona climática

Transmitancias	A			B			C			D			E		
	Min	Rec	AF	Min	Rec	AF	Min	Rec	AF	Min	Rec	AF	Min	Rec	AF
U _{muros}	1,25	0,50	0,30	1,00	0,38	0,27	0,75	0,29	0,18	0,6	0,27	0,18	0,55	0,23	0,18
U _{cubiertas}	0,80	0,44	0,23	0,65	0,33	0,21	0,5	0,23	0,15	0,40	0,22	0,15	0,35	0,19	0,15
U _{suelos}	1,25	1,20	0,37	1,00	0,69	0,32	0,75	0,48	0,22	0,60	0,48	0,19	0,55	0,48	0,19
U _{ventanas}	4,00	3,20	2,60	3,20	2,70	2,10	2,70	2,30	1,80	2,30	1,80	1,40	1,80	1,80	1,30

Transmitancias en W/m²·K.

Min: valores mínimos, Rec: valores recomendados, AF: valores de alta eficiencia.

Tabla 2: Transmitancias de puentes térmicos según escenario

Tipo de Puente Térmico	Base	Mejora 1	Mejora 2
Encuentro de fachada con forjado	0,65	0,2	0,2
Encuentro de fachada con cubierta	0,45	0,2	0,2
Encuentro de fachada con solera	0,15	0,15	0,15
Encuentro de fachada con suelo en contacto con aire exterior	0,45	0,2	0,2
Pilar en esquina (saliente)	0,15	0,1	0,1
Pilar en rincón (entrante)	-0,15	-0,15	-0,15
Pilar integrado en fachada	0,75	0,2	0,2
Contorno de hueco (jambas y alféizar de ventanas)	0,4	0,1	0,05
Caja de persiana (dintel de ventanas)	0,4	0,1	0,05

Transmitancias en W/m·K.

Para evaluar la necesidad de control solar, se evalúa el indicador para los edificios y climas y se estima cuál debe ser el factor solar (transmitancia total de energía solar) medio que se requiere para cumplir la exigencia de 2 kWh/m²·mes durante el mes de julio, como muestra la Tabla 3. Puesto que la transmitancia total de energía solar que tienen las ventanas sin elemento de sombra móvil es mayor en todos los casos que el reflejado en esta tabla, es necesario, en todos los casos, recurrir a un elemento específico de control solar de acuerdo con la EN 14501, siendo en la mayoría de los casos de categoría pequeño o moderado.

Tabla 3: Transmitancia total de energía solar según tipo de edificio y zona climática

Tipología	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
Bloque Aislado Este	0,51	0,47	0,46	0,44
Bloque Aislado Sur	0,78	0,74	0,72	0,70
Bloque Entremedianeras Este	0,49	0,48	0,47	0,46
Bloque Entremedianeras Sur	0,47	0,45	0,44	0,43
Bloque en Manzana	0,36	0,33	0,33	0,31
Vivienda Aislada Este	0,26	0,24	0,24	0,23
Vivienda Aislada Sur	0,21	0,19	0,19	0,18
Vivienda Entremedianeras Este	0,26	0,24	0,23	0,22
Vivienda Entremedianeras Sur	0,54	0,52	0,51	0,49
Vivienda Pareada Sudeste	0,23	0,21	0,21	0,20

Finalmente, los últimos dos parámetros que intervienen en el cálculo de las demandas de calefacción y refrigeración son la infiltración y ventilación. En este estudio, se calculan los caudales nominales de ventilación requeridos, haciendo hipótesis sobre el número de dormitorios y baños que tendrían las diferentes viviendas contempladas. Asimismo, se establecen 2 niveles de estanqueidad: valores límite según CTE-HE1 (que origina valores n50 de entre 6 y de 3 h⁻¹ según compacidad) y un valor fijo de 3 h⁻¹. Con los dos grados de libertad citados se obtienen valores promedio de renovaciones hora equivalentes, incluyendo ventilación e infiltración (ACH equivalente), que oscilan entre 0,6 y 0,3 h⁻¹.

3.3 Instalaciones

Los consumos de calefacción, refrigeración y ACS dependen de las instalaciones definidas para satisfacer las demandas, estableciendo 52 conjuntos de soluciones energéticas. Por un lado, en cuanto a la producción, se pueden dar 4 combinaciones, según zona climática y sean atendidas las demandas de ACS, de ACS y calefacción, de ACS y refrigeración, y/o de ACS, calefacción y refrigeración, como resume la Tabla 4. Por otro lado, en cuanto a los equipos de generación para la producción de calor para la calefacción, se definen calderas de condensación a gas (CC), bombas de calor a gas aire-agua (BCG A/W), bombas de calor eléctricas aire-agua (BCE A/W), bombas de calor eléctricas aire-aire (BCE A/A), equipos de biomasa (BioM), y equipos híbridos de caldera a gas con bomba de calor eléctrica (H CG-BCE). En cuanto a los equipos de generación para la producción de frío para la refrigeración, se definen enfriadoras eléctricas (EE), BCG A/W, BCE A/W, BCE A/A, y H CG-BCE. En cuanto a los equipos de generación para la producción principal de calor para el ACS, se definen sistemas de energía solar-térmica (ST), BCG A/W, BCE A/W, y BioM. En cuanto a los equipos de generación para la producción secundaria de calor para el ACS, se definen calderas de condensación (CC), calentadores a gas (CA), termos eléctricos por efecto Joule (TE), y H CG-BCE. Asimismo, en cuanto a los equipos terminales de los sistemas de calefacción, se definen radiadores murales (RAD), ventiloconvectores de techo (FC), suelos radiantes (SR), y evaporadores de pared (SP). En cuanto a los equipos terminales de los sistemas de refrigeración, se definen FC, SR, y SP. Además, estos conjuntos de instalaciones pueden ser individuales (I), colectivas (C) o mixtas (I/C), y su ámbito de aplicación en zonas climáticas cálidas (A3-B4), frías (C1-E1) o en todo el territorio (A3-E1), tal y como muestra la Tabla 5.

Tabla 4: Combinaciones de servicio según zona climática

Zonas Climáticas	ACS	Cal+ACS	Ref+ACS	Cal+Ref+ACS
A3, A4, B3, B4	X	-	X	X
C1, C2, C3, C4, D1, D2, D3, E1	-	X	-	X

Tabla 5: Matriz de instalaciones

Escenario	Producción	Generación				Terminales		Temperatura			Tipo	Zonas Climáticas
		CAL	REF	ACS1	ACS2	CAL	REF	CAL	REF	ACS		
1	CAL + ACS	CC	-	ST	CC	RAD	-	60	-	60	I	C1-E1
2	CAL + ACS + REF	CC	EE	ST	CC	RAD	FC	60	7	60	I	C1-E1
3	CAL + ACS	CC	-	ST	CC	RAD	-	40	-	60	I	C1-E1
4	CAL + ACS + REF	CC	EE	ST	CC	FC	FC	45	7	60	C	C1-E1
5	CAL + ACS	CC	-	ST	CC	RAD	-	60	-	60	C	C1-E1
6	CAL + ACS + REF	CC	EE	ST	CC	SR	SR	40	17	60	C	C1-E1
7	CAL + ACS	CC	-	ST	CC	SR	-	40	-	60	C	C1-E1
8	CAL + ACS + REF	BCG A/W	BCG A/W	BCG A/W	CC	SR	SR	40	17	60	C	C1-E1
9	CAL + ACS + REF	BCE A/W	BCE A/W	BCE A/W	TE	FC	FC	45	7	60	I	C1-E1
10	CAL + ACS + REF	BCE A/W	BCE A/W	BCE A/W	TE	SR	SR	40	17	60	I	C1-E1
11	CAL + ACS	BCE A/W	-	BCE A/W	TE	FC	-	45	-	60	C	C1-E1
12	CAL + ACS + REF	BCE A/W	BCE A/W	BCE A/W	TE	FC	FC	45	7	60	C	C1-E1
13	CAL + ACS	BCE A/W	-	BCE A/W	TE	SR	-	40	-	60	C	C1-E1
14	CAL + ACS + REF	BCE A/W	BCE A/W	BCE A/W	TE	SR	SR	40	17	60	C	C1-E1
15	CAL + ACS	BioM	-	BioM	-	SR	-	40	-	60	C	C1-E1
16	CAL + ACS + REF	BioM	EE	BioM	-	SR	SR	40	17	60	C	C1-E1
17	CAL + ACS	BioM	-	BioM	-	RAD	-	60	-	60	C	C1-E1
18	CAL + ACS + REF	BioM	EE	BioM	-	RAD	FC	60	7	60	C	C1-E1
19	CAL + ACS + REF	H CG-BCE	H CG-BCE	ST	H CG-BCE	RAD	FC	60	7	60	I	C1-E1
20	CAL + ACS + REF	H CG-BCE	H CG-BCE	ST	H CG-BCE	SR	SR	40	17	60	I	C1-E1
21	CAL + ACS + REF	H CG-BCE	H CG-BCE	ST	H CG-BCE	FC	FC	45	7	60	I	C1-E1
22	ACS	-	-	ST	CA	-	-	-	-	60	I	A3-B4
23	ACS + REF	-	EE	ST	CA	-	FC	-	7	60	I	A3-B4
24	ACS	-	-	ST	CA	-	-	-	-	60	C	A3-B4
25	ACS + REF	-	EE	ST	CA	-	FC	-	7	60	I/C	A3-B4
26	ACS + REF	-	EE	ST	CA	-	FC	-	7	60	C	A3-B4
27	CAL + ACS + REF	BCG A/W	BCG A/W	BCG A/W	CA	FC	FC	45	7	60	C	A3-B4
28	ACS	-	-	ST	TE	-	-	-	-	60	I	A3-B4
29	ACS	-	-	BCE A/W	TE	-	-	-	-	60	I	A3-B4
30	CAL + ACS + REF	BCE A/W	BCE A/W	BCE A/W	TE	FC	FC	45	7	60	I	A3-B4
31	CAL + ACS + REF	BCE A/A	BCE A/A	ST	TE	SP	SP	40	7	60	I	A3-B4
32	ACS	-	-	BCE A/W	TE	-	-	-	-	60	C	A3-B4
33	CAL + ACS + REF	BCE A/W	BCE A/W	BCE A/W	TE	FC	FC	45	7	60	C	A3-B4
34	ACS	-	-	BioM	-	-	-	-	-	60	I	A3-B4
35	CAL + ACS + REF	BioM	EE	BioM	-	FC	FC	45	7	60	I	A3-E1
36	CAL + ACS + REF	BioM	EE	BioM	-	RAD	FC	60	7	60	C	A3-B4
37	CAL + ACS + REF	BioM	EE	BioM	-	FC	FC	45	7	60	C	A3-B4
38	CAL + ACS + REF	H CG-BCE	H CG-BCE	ST	H CG-BCE	RAD	FC	60	7	60	I	A3-B4
39	CAL + ACS + REF	H CG-BCE	H CG-BCE	ST	H CG-BCE	SR	SR	40	17	60	I	A3-B4
40	CAL + ACS + REF	H CG-BCE	H CG-BCE	ST	H CG-BCE	FC	FC	45	7	60	I	A3-B4
41	ACS	-	-	BioM	-	-	-	-	-	60	C	A3-B4
42	CAL + ACS + REF	BioM	EE	BioM	-	FC	FC	45	7	60	I/C	A3-E1
43	CAL + ACS	BioM	-	BioM	-	SR	-	40	-	60	I	C1-E1
44	CAL + ACS	BioM	-	BioM	-	RAD	-	60	-	60	I	C1-E1
45	CAL + ACS + REF	BCE A/A	BCE A/A	ST	CA	SP	SP	45	7	60	I	A3-B4
46	CAL + ACS + REF	BCE A/A	BCE A/A	ST	CA	SP	SP	45	7	60	C	A3-B4
47	CAL + ACS + REF	CC	BCE A/W	ST	CC	RAD	FC	60	7	60	I/C	C1-E1
48	CAL + ACS + REF	CC	BCE A/W	ST	CC	SR	FC	40	7	60	I/C	C1-E1
49	CAL + ACS + REF	BioM	BCE A/W	BioM	-	RAD	FC	60	7	60	I/C	C1-E1
50	CAL + ACS + REF	BioM	BCE A/W	BioM	-	SR	FC	40	7	60	I/C	C1-E1
51	CAL + ACS + REF	BioM	BCE A/W	BioM	-	RAD	FC	60	7	60	I	A3-E1
52	CAL + ACS + REF	BioM	BCE A/W	BioM	-	SR	FC	40	7	60	I	A3-E1

Colores según vector energético: en azul equipos que funcionan con gas natural, en gris equipos que funcionan con electricidad, en azul grisáceo equipos híbridos, en verde equipos que funcionan con biomasa, y en naranja equipos que funcionan con energía solar térmica.

Las principales hipótesis para la caracterización energética y económica de las instalaciones son:

- El comportamiento térmico de equipos se tiene en cuenta a partir de la estimación de las prestaciones medias estacionales según los documentos reconocidos “Prestaciones medias estacionales de las bombas de calor para producción de calor en edificios” y “Prestaciones medias estacionales de equipos y sistemas de producción de frío y calor en edificios de viviendas” del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).
- Las prestaciones medias estacionales se suponen prestaciones nominales en función de la temperatura de trabajo del equipo en estudio. Estas prestaciones nominales de cada equipo se eligen para un equipo cuyas prestaciones representen la media del estado actual de mercado, a los que se les aplican las leyes de costes. Asimismo, la elección de las prestaciones (COP y EER) de las bombas de calor y enfriadoras eléctricas se ha analizado la base de datos de EUROVENT (<http://www.eurovent-certification.com/>).
- Las potencias nominales de los equipos se fijan tras el análisis de potencias puntas demandadas por los edificios para atender los servicios de calefacción, refrigeración y ACS. Mientras que las potencias puntas de calefacción y refrigeración se calculan mediante la simulación detallada de los edificios en la HULC (Gobierno de España, 2023), las instalaciones solares se dimensionan para dar una cobertura de un 60% o un 70% de la demanda de ACS anual de las viviendas según caso, mediante el método f-chart (Klein, Beckman y Duffie, 1976; Duffie y Beckman, 1980).
- La cobertura de ACS, en los casos con 2 equipos encargados de dar ACS, se fija según la temperatura de distribución del primero de ellos, o, en su defecto, en instalaciones solares fijada según el caso a estudio.
- Las demandas diarias de ACS se calculan considerando 100 m² para 3 personas. Además, para calcular la punta, se considera que un 15% del consume diario se consume durante 10 minutos a la temperatura de reposición mínima.
- Los equipos híbridos se simulan siguiendo las siguientes hipótesis: primero, en régimen de refrigeración, la operación es 100% para la bomba de calor eléctrica; segundo, en régimen de ACS, el 100% de la demanda que debe combatir el equipo (aquella no cubierta por el sistema solar térmico), la satisface la caldera de condensación acoplada; tercero, en régimen de calefacción, se considera que el 20% de la demanda queda cubierta por la caldera de condensación y el 80% por la bomba de calor eléctrica.
- La temperatura de producción de los equipos se fija en función de la unidad terminal acoplada, En el caso de RAD, la temperatura de impulsión se fija en 60°C; para FC se ha considerado 45°C/7°C y, finalmente, para SR 40°C/17°C.
- Los equipos mixtos (calefacción y ACS) consideran que la temperatura de trabajo se fija por el régimen de calefacción, asumiendo que el equipo dispone de un sistema de control adecuado para garantizar la temperatura requerida cuando opera produciendo ACS.
- En caso de que no se instalen equipos para calefacción y/o refrigeración, los rendimientos de los equipos de sustitución, con los que convertir las demandas en consumos, son de 0,92 para la producción de calor (mediante gas natural) y ACS y 2,60 para los equipos de producción de frío (mediante electricidad).

3.4 Coste de ciclo de vida

El coste del ciclo de vida de los edificios es el coste total de dichos edificios durante toda su vida, desde que se construye hasta que se demuele. Entre los costes a tener en cuenta, el coste de operación es el coste de los consumos energéticos de los sistemas de acondicionamiento durante toda la vida del edificio. Estos costes se distribuyen a lo largo de la vida del edificio, y, por lo tanto, pueden oscilar debido a la variación de los precios de la energía y/o debido a la inflación.

Por convención, los costes de operación se considera que se pagan por años, al final de cada año. Dado que las cantidades monetarias se ponen en juego en momentos diferentes del ciclo de vida, el valor presente permite calcular el coste de una operación económica en euros del momento presente, calculando el valor presente de todas las cantidades que se vayan a gastar en el futuro. Los valores de la tasa de descuento y la inflación considerados son valores promedio para todo el ciclo de vida. El Coste de Ciclo de Vida (CCV) de un edificio se calcula de acuerdo con la Ecuación 1:

$$CCV = CED + \sum_{k=1}^n \frac{C_k}{(1 + i_{ef})^k} \quad (1)$$

Donde CED es el coste de la edificación, suma de los costes de la envolvente y de los sistemas de acondicionamiento (mientras que de la envolvente se considera el coste de las mejoras que se vayan a considerar, de los sistemas se considera el coste de adquisición e instalación del equipo de acondicionamiento), C_k es el coste anual e i_{ef} es la tasa de descuento, considerando el efecto de la inflación. Además, el periodo para el cálculo del CCV se toma en de 30 años y la tasa de descuento, considerando el efecto de la inflación, en el 3%.

4. Resultados

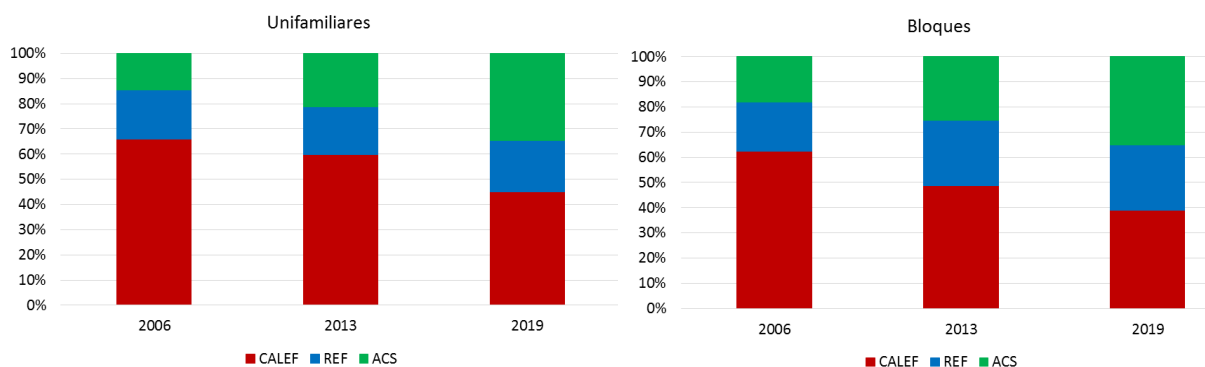
Los resultados se obtienen tras simular las 6 tipologías edificatorias con las 2 prestaciones de la envolvente, las 2 situaciones relativas a la permeabilidad y estanqueidad, las 2 orientaciones de los edificios y una contribución renovable al ACS mínima o mejorada, considerando tanto instalaciones individuales como colectivas, de aplicación en las diferentes zonas climáticas de España (bien en las zonas cálidas, bien en las zonas frías, bien en todo el territorio). Estas combinaciones generan un total 16.480 casos, desglosados en 10.720 casos plurifamiliares y 6.760 casos unifamiliares, como resume la Tabla 6.

Tabla 6: Simulaciones energéticas según caso

Tipología	Instalación	Orientación	Prestación	Renovación	Matriz	Zona climática	Contribución	Casos
Bloque Aislado	Individual	2	2	2	17	4	2	1088
	Colectiva	2	2	2	25	8	2	3200
Bloque Entremedianeras	Individual	2	2	2	17	4	2	1088
	Colectiva	2	2	2	25	8	2	3200
Bloque Manzana	Individual	1	2	2	17	4	2	544
	Colectiva	1	2	2	25	8	2	1600
Viviendas Plurifamiliares								10720
Vivienda Aislada	Individual	2	2	2	12	12	2	2304
Vivienda Entremedianeras	Individual	2	2	2	12	12	2	2304
Vivienda Pareada	Individual	1	2	2	12	12	2	1152
Viviendas Unifamiliares								5760
Total Casos								16480

Si se comparan los resultados con las exigencias de las versiones anteriores del CTE de 2006 y 2013, se confirma la reducción de las demandas energéticas de calefacción y refrigeración. En el régimen de calefacción, las demandas se reducen de un 59% en el caso de viviendas unifamiliares a un 69% en el caso de viviendas plurifamiliares, mientras que en refrigeración las demandas se reducen un 55% y 31%, respectivamente. Esto implica que, al mantenerse las demandas de ACS, su peso relativo pasa de un 15% en viviendas unifamiliares y un 18% en plurifamiliares a un 35%, como muestra la Figura 4.

Figura 4: Demandas energéticas según evolución normativa y tipología edificatoria

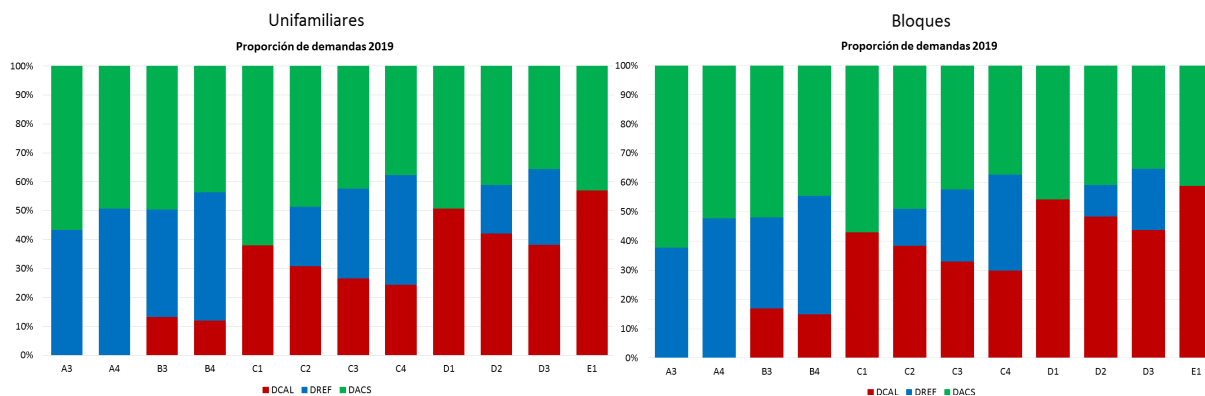


Superior: Demandas de calefacción y refrigeración según actualizaciones del CTE

Inferior: Peso relativo de las demandas de calefacción, refrigeración y ACS según actualizaciones del CTE

Sin embargo, el análisis de las demandas energéticas por zona climática muestra la escasa necesidad de calefacción en las zonas cálidas y de refrigeración en las zonas frías, alcanzando la demanda de ACS entre el 35 y el 55%, como muestra la Figura 5.

Figura 5: Peso relativo de las demandas energéticas según zona climática



Si se realiza el análisis por vector energético, se comprueba que el punto débil para verificar las exigencias del actual CTE-HE es la sección HE4 relativa a la renovabilidad en la producción de ACS. Las nuevas exigencias dejan fuera algunas de las soluciones que en la edición anterior eran válidas, tales como las bombas de calor eléctricas. Asimismo, las bombas de calor a gas no cumplen la renovabilidad de ACS con las hipótesis de cálculo realizadas. Para lograrlo, se necesitaría de nuevos diseños y dimensionados, con esquemas de almacenamiento intermedio y estrategias de control específicas que tengan en cuenta el calor residual. Por tanto, una vez satisfecha la sección HE4 y cumplidos los valores límite relativos a la limitación de la demanda contenidos en la sección HE1, el cumplimiento del valor límite de la energía primaria total es casi automático, con independencia de los equipos de producción de calor y frío que se utilicen. Si además se refuerza la exigencia de transmisividad global de la envolvente para limitar la demanda de calefacción, el cumplimiento del valor límite de la energía primaria no renovable también resulta casi automático, con independencia de los equipos de producción de calor y frío que se utilicen. No obstante, si no se refuerza la envolvente, el cumplimiento del valor límite de la energía primaria no renovable es muy probable, con independencia de los equipos de producción de calor y frío, salvo las viviendas unifamiliares con compacidades bajas y mal orientadas en las zonas climáticas frías. Entre las opciones que cumplen las exigencias del CTE-HE, el gas natural presenta un potencial de utilización considerable, siendo la opción más favorable en numerosas ocasiones. La Tabla 7 muestra el cumplimiento de la norma, tanto en términos de energía primaria total y energía primaria no renovable como en términos de contribución renovable para el ACS.

Tabla 7: Cumplimiento del CTE según vector energético y tipología de vivienda

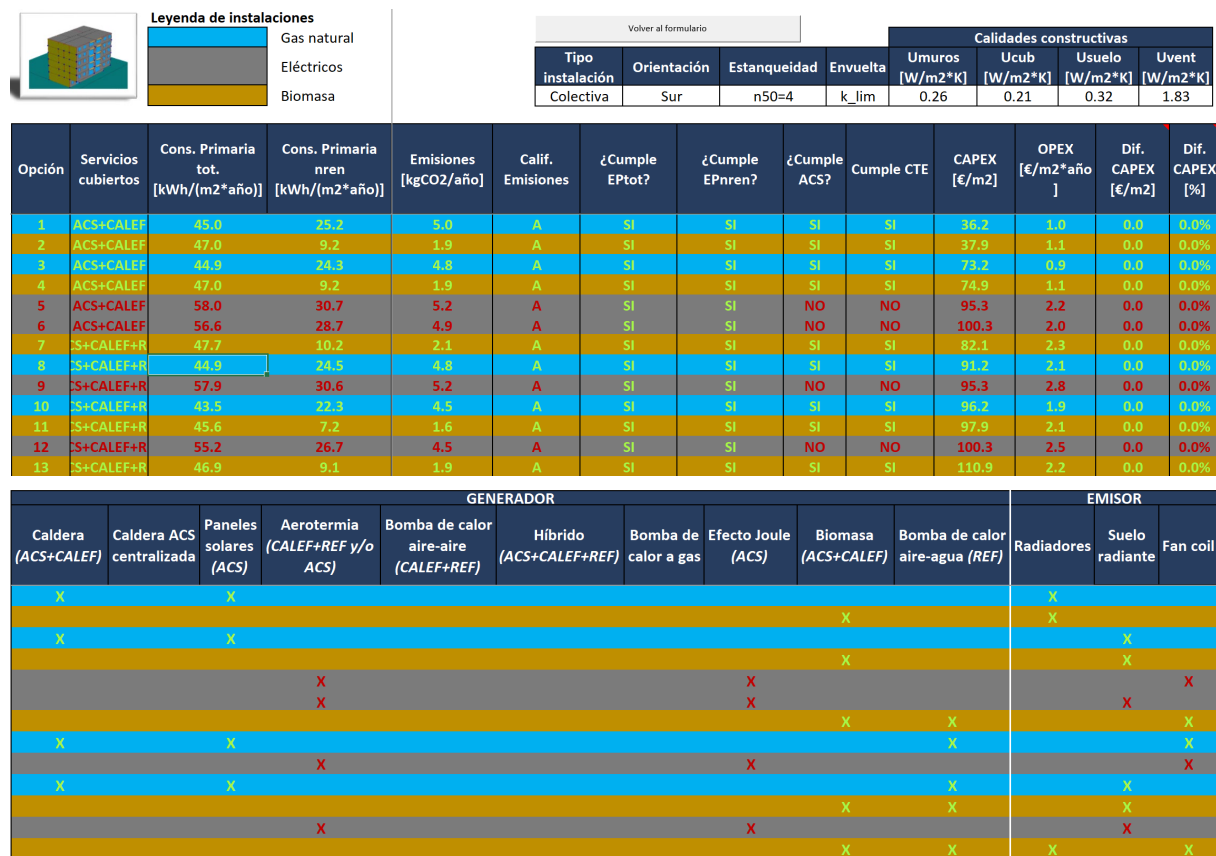
Prestación	Renovación	Contribución	Vector	Cumplimiento							
				Unifamiliares				Plurifamiliares			
				Casos	EPT	EPNR	RACS	Casos	EPT	EPNR	RACS
K _{límite}	n ₅₀ CTE	HE4 Bajo	Gas Natural	160	100%	74%	100%	460	100%	88%	87%
			Electricidad	160	79%	66%	25%	360	95%	84%	11%
			Biomasa	220	100%	100%	100%	300	100%	100%	100%
			Híbrido	180	100%	97%	100%	180	100%	100%	100%
0,8 K _{límite}	n ₅₀ 3	HE4 Alto	Gas Natural	160	100%	100%	100%	460	100%	97%	88%
			Electricidad	160	98%	85%	25%	360	100%	94%	11%
			Biomasa	220	100%	100%	100%	300	100%	100%	100%
			Híbrido	180	100%	100%	100%	180	100%	100%	100%
Total	Total		Gas Natural	1280	100%	91%	100%	4000	100%	95%	88%
			Electricidad	1280	90%	77%	25%	2880	99%	90%	11%
			Biomasa	1760	100%	100%	100%	2400	100%	100%	100%
			Híbrido	1440	100%	99%	100%	1440	100%	100%	100%

Una vez realizadas las simulaciones energéticas y cálculos económicos, los resultados se exportan a una hoja de datos que se prepara para ejercer de visor, como muestra la Figura 6, cuya versión actualizada puede descargarse en <http://tmt.us.es/NORBA/NORBA.xls>. La interfaz de usuario permite indicarle a la herramienta toda la información necesaria mostrar los resultados: zona climática en la que se encuentra el edificio bajo estudio, tipo de edificio, tipo de instalación, situación del edificio y orientación, y las mejoras que se deseen aplicar. Una vez obtenidos los casos seleccionados, la herramienta muestra al usuario los resultados de las instalaciones que sean aplicables al tipo de edificio, tipo de instalación y zona climática seleccionada, como muestra la Figura 7. En la parte superior izquierda, el tipo de edificio y la leyenda de instalaciones. En la parte superior derecha, la estanqueidad, prestación de la envolvente y valores orientativos de las transmitancias necesarias.

Figura 6: Configurador de soluciones energéticas en el marco del CTE-HE

En los resultados, cada fila corresponde a un tipo de instalación, coloreada en función del vector energético requerido. Los resultados se dividen por bloques de servicios prestados. Finalmente, el usuario puede visualizar los equipos necesarios de cada instalación, tanto generadores (calderas, bombas de calor, equipos de biomasa, paneles solares térmicos, etc.) como emisores (radiadores, suelos radiantes o ventiloconvectores).

Figura 7: Visor de resultados



5. Conclusiones

Este estudio compara diferentes soluciones energéticas disponibles para edificios de nueva construcción en el marco del CTE, centrandose su atención en la adaptación hacia los EECN bajo las condiciones climáticas variables de la España peninsular. A través de un enfoque metodológico riguroso, se analizan 52 configuraciones distintas que combinan diversas tecnologías de calefacción, refrigeración y producción de ACS, aplicables tanto en viviendas plurifamiliares como unifamiliares, y extendidas a las 12 zonas climáticas de la España Peninsular. En este contexto, se observa una necesidad crítica de rediseño y ajuste en las soluciones que implican la producción de ACS para cumplir con los requisitos de renovabilidad del CTE, especialmente en lo que respecta a las bombas de calor eléctricas (que cumplen entre el 11% y 25% de los escenarios) y las tecnologías de gas (que alcanzan cumplimientos entre el 88% y el 100%). Por ello, este estudio refuerza la importancia de una planificación energética meticulosa en las fases tempranas del diseño arquitectónico, destacando cómo una combinación cuidadosa de mejoras en la envolvente del edificio y la selección estratégica de sistemas energéticos puede conducir a edificaciones más sostenibles y energéticamente eficientes. El visor NORBA ofrece una plataforma para facilitar este proceso, permitiendo una evaluación rápida y precisa de diversas configuraciones energéticas.

6. Referencias

- Barthelmes, V. M., Becchio, C., y Corgnati, S. P. (2016). Occupant behavior lifestyles in a residential nearly zero energy building: Effect on energy use and thermal comfort. *Science and Technology for the Built Environment*, 22(7), 960-975.
<https://doi.org/10.1080/23744731.2016.1197758>
- Duffie, J.A. y Beckman, W.A. (1980). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley Interscience, New York.
- European Union. (2003). Directive 2002/91/EC on the energy performance of buildings. *Official Journal of the European Communities*, 1, 65-71.
- European Union. (2010). Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings. *Official Journal of the European Union*, 153, 13-35.
- European Union. (2012). Directive 2012/27/EU on energy efficiency. *Official Journal of the European Union*, 31, 1-56.
- European Union. (2018). Directive 2018/844/EU amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency. *Official Journal of the European Union*, 156, 75-91.
- European Union. (2021). Energy performance of buildings directive. Energy efficient buildings. https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en
- European Union. (2023). Directive 2023/1791 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955. *Official Journal of the European Union*, 231, 1-111.
- Gobierno de España. (1979). NBE-CT-79 Norma Básica de Edificación, sobre condiciones térmicas en los edificios. *Boletín Oficial del Estado*, 253, 24524-24550.
- Gobierno de España. (1999). Ley 38/99 de Ordenación de la Edificación. *Boletín Oficial del Estado*, 266, 38925-38934.
- Gobierno de España. (2006). Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. *Boletín Oficial del Estado*, 74, 11816-11831.
- Gobierno de España. (2019). Real Decreto 244/2019 por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica. *Boletín Oficial del Estado*, 83, 35674-35719.
- Gobierno de España. (2019b). Real Decreto 732/2019 por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación. *Boletín Oficial del Estado*, 311, 140488-140674.
- Gobierno de España. (2022). Real Decreto 450/2022 por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación. *Boletín Oficial del Estado*, 142, 81973-81989.
- Gobierno de España. (2023). HULC. Herramienta Unificada Líder Calener. <https://www.codigotecnico.org/Programas/HerramientaUnificadaLIDERCALENER.html>
- Klein, S. A., Beckman, W. A., y Duffie, J. A. (1976). A Design Procedure For Solar Heating Systems. *Solar energy*, 18, 113- 126.
- Marando, F., Heris, M. P., Zulian, G., Udías, A., Mentaschi, L., Chrysoulakis, N., Parastatidis, D., y Maes, J. (2022). Urban heat island mitigation by green infrastructure in European Functional Urban Areas. *Sustainable Cities and Society*, 77, 103564.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103564>

Matthews, T. K. R., Wilby, R. L., y Murphy, C. (2017). Communicating the deadly consequences of global warming for human heat stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(15), 3861-3866. <https://doi.org/10.1073/pnas.1617526114>

Nejat, P., Jomehzadeh, F., Taheri, M. M., Gohari, M., y Abd. Majid, M. Z. (2015). A global review of energy consumption, CO2 emissions and policy in the residential sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 843-862. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.066>

Uihlein, A., y Eder, P. (2010). Policy options towards an energy efficient residential building stock in the EU-27. *Energy and Buildings*, 42(6), 791-798. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.11.016>

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

