



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

TRANSICIÓN HACIA EDIFICIOS DE ENERGÍA CASI NULA EN EUROPA

Autora: Andrea Toldrà Domínguez.

Tutor: Cristian Fàbrega Gallego

Curso académico: 2017-2018

Máster de Energías Renovables y Sostenibilidad Energética.

Dos Campus d'Excel·lència Internacional:

B:KC Barcelona
Knowledge
Campus

HUB^C Health Universitat
de Barcelona
Campus

Resumen

En la actualidad, prácticamente el 40 % de la energía final consumida en Europa corresponde a energía consumida en edificios. La Comisión Europea está apostando por mejorar la eficiencia energética de los edificios para disminuir su demanda energética y en consecuencia su consumo de energía. Con esta idea se quiere llevar a cabo una transición hacia edificios de consumo de energía casi nula.

Sin embargo, cada país de la Unión Europea tiene una normativa distinta que regula los criterios de eficiencia energética de los edificios, en particular de edificios residenciales de nueva construcción. El objetivo de este trabajo es mostrar la gran diferencia que encontramos hoy en día en las exigencias que establece cada normativa, cómo se enfoca esta en cada país y qué país construye edificios más eficientes.

En comparación con Francia, Alemania y Bélgica, España se muestra a la cola de una transición que es más que necesaria. A lo largo del trabajo se describen algunas modificaciones que la normativa española debería adoptar para construir edificios de energía casi nula, teniendo en cuenta las normativas de edificación de cada uno de los países considerados en este proyecto.

Abstract

Nowadays, about the 40 % of the final energy consumption in Europe corresponds to the buildings energy consumption. The European Commission relies on improving the buildings energy efficiency to decrease its energy demand, and therefore its energy consumption. Accordingly, the goal is to evolve towards nearly zero energy buildings.

Nevertheless, each European Union country has its own regulation defining how a nearly zero energy building should be, especially new construction residential buildings. The goal of this project is to show the considerable difference that it is found among the different countries regulation, tackling also which of them has the most efficiency buildings.

Spain is far behind of France, Germany and Belgium referring to the transition to nearly zero energy buildings. Along this project, we describe some of the modifications that the Spanish regulation should adopt to construct nearly zero energy buildings, taking into account those regulations needed.

Índice general

1. Introducción y objetivos.	2
2. Aspectos a tener en cuenta en el estudio de eficiencia energética de un edificio.	5
2.1. Condiciones exteriores según ubicación.	5
2.2. Elementos constructivos: envolvente térmica y particiones interiores.	6
2.3. Huecos y puentes térmicos.	6
2.4. Instalaciones de calefacción, agua caliente sanitaria y refrigeración.	7
2.5. Iluminación y ventilación	7
3. Normativas europeas	8
3.1. España	8
3.2. Francia	9
3.3. Alemania	11
3.4. Bélgica	13
4. Edificio objeto de estudio	15
4.1. Bajo la normativa francesa	17
4.1.1. Cambios necesarios en el edificio para cumplir la normativa francesa	21
4.2. Bajo la normativa alemana	24
4.2.1. Cambios necesarios en el edificio para alcanzar el estándar de ‘KfW Effizienzhaus 55’	26
4.3. Bajo la normativa belga	27
4.3.1. Cambios necesarios en el edificio para cumplir la normativa de Bruselas PEB 2015	28
5. Conclusiones	30
Bibliografía	33
A. Sistemas constructivos del edificio diseñado para el cumplimiento del DB-HE	35
B. Comparativa de la fachada y los huecos considerados para el cumplimiento de la normativa de cada país.	39

Capítulo 1

Introducción y objetivos.

Actualmente existe una tendencia creciente en Europa a que las iniciativas políticas relacionadas con la energía se centren en mejorar la eficiencia energética, en un intento por reducir la demanda de energía y desacoplarla del crecimiento económico. Con ello se pretende abordar simultáneamente los problemas de dependencia de las importaciones de energía, las emisiones relacionadas y costos de la misma. Mediante la Directiva 2009/28/CE [1] relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, la Unión Europea (UE) se comprometió a un aumento de la eficiencia energética en un 20 % para el año 2020 por el cual cada miembro de la UE debe desarrollar un *Plan de Acción Nacional para la Eficiencia Energética* [2]. Las políticas públicas en Europa se habían centrado durante mucho tiempo en la producción de electricidad renovable; sin embargo la electricidad representa únicamente el 15 % del consumo de energía final de los países de la UE de manera que se ha producido un mayor interés por mejorar la eficiencia energética.

La intensidad energética es una medida de la eficiencia energética de una economía. Este indicador se mide como la relación entre el consumo interno bruto de energía y el producto interior bruto (PIB) del país y es clave para medir el progreso en eficiencia energética de una economía. Se expresa en kilogramos equivalentes de petróleo (kep) por 1000 euros y para facilitar el análisis en el tiempo, los cálculos se basan en el PIB a precios constantes para el año 2010, de manera que si este indicador decrece en un país manteniendo el PIB constante indica que este es más eficiente en el uso de su energía.

La propia Unión Europea establece a día de hoy que el máximo potencial de ahorro de energía, eficiencia y reducción de gases de efecto invernadero recae en el sector de la construcción, de manera que la Comisión Europea y los gobiernos nacionales de la UE están actuando en consecuencia. La generación de calor, que se corresponde con el consumo principal de energía en los edificios, es el área principal de actuación para combatir el cambio climático y frenar las emisiones de gases de efecto invernadero. Por tanto, los edificios son considerados en la actualidad los principales consumidores de energía. Sin embargo, cuentan con un amplio potencial de reducción de dicho consumo que se pretende explotar.

Según los datos de la Unión Europea recogidos en la figura 1.1, aproximadamente el 40 % del consumo final de energía en la UE corresponde a los edificios [3], considerando tanto el sector residencial como el sector servicios. Además, puesto que se trata de un sector en expansión debido al aumento de la población y al crecimiento de las ciudades, la demanda energética de los mismos está aumentando. En consecuencia, unos de los objetivos de la Unión Europea es reducir el consumo energético de los edificios, tanto en la producción de calor para calefacción y agua caliente sanitaria como en la producción de frío para refrigeración, en los climas más cálidos.

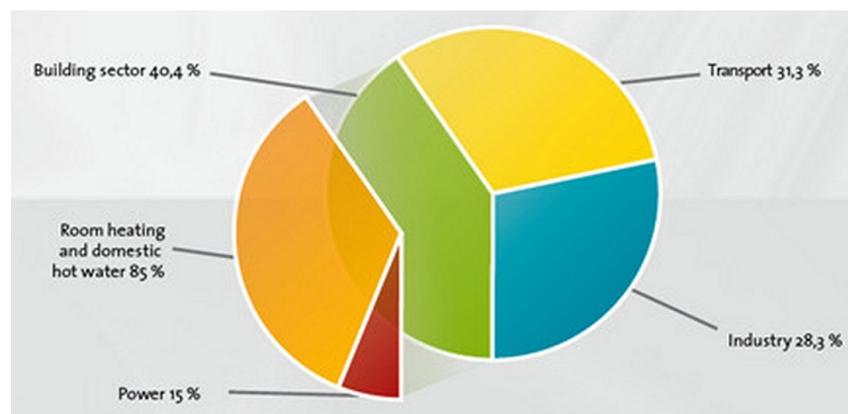


Figura 1.1: Consumo de energía final de la UE del año 2015.

La reducción del consumo energético de un edificio está asociada al aumento de la eficiencia energética del mismo. Un edificio es más eficiente cuanto menor es su consumo energético, y un edificio consume menos energía cuanto menor es su demanda energética. Por todo ello, aumentar la eficiencia de los edificios radica principalmente en reducir la demanda energética de los mismos.

Con esta idea la Unión Europea fijó en la Directiva 2010/31/UE [4], relativa a la eficiencia energética de los edificios, las bases para garantizar el cumplimiento de sus propios objetivos, no solo en cuanto a eficiencia energética, sino también en cuanto a consumo energético de los edificios, reducción de gases de efecto invernadero y generación de energía a partir de fuentes renovables. Para ello la eficiencia energética se puede establecer como el cociente de la demanda energética de un edificio real respecto a la demanda energética del edificio de referencia teórico establecido.

En base a esta Directiva, cada uno de los países de la Unión Europea ha establecido su propia normativa que permite regular la eficiencia energética de los edificios para cumplir con los objetivos de la UE de acuerdo a lo establecido en el artículo 4: “*Los Estados miembros tomarán las medidas necesarias para garantizar que se establezcan unos requisitos mínimos de eficiencia energética de los edificios o unidades de este con el fin de alcanzar niveles óptimos de rentabilidad [...]*”.

Además, en la propia Directiva se establece una tipología de edificios de mayor eficiencia energética denominados edificios de consumo de energía casi nulo (*Nearly-zero energy buildings, NZEBs* en inglés) que define de la siguiente forma: un edificio de consumo de energía casi nulo es *un edificio con un nivel de eficiencia energética muy alto [...] La cantidad casi nula o muy baja de energía requerida debería estar cubierta, en muy amplia medida, por energía procedente de fuentes renovables, incluida energía procedente de fuentes renovables producida in situ o en el entorno*. El objetivo final de esta tipología de edificios es llegar a construir edificios que no consuman energía, pero a día de hoy el objetivo es que consuman la menor energía posible y que toda la energía consumida proceda de fuentes renovables. Nuevamente se establece que cada país llevará a cabo la definición específica de este tipo de edificios de la manera que considere oportuna, mediante la designación de un valor numérico para dicho nivel de eficiencia energética muy alto.

En España, el Código Técnico de Edificación (CTE) [5] es el marco normativo que establece y desarrolla las exigencias básicas de calidad de los edificios y sus instalaciones, permitiendo demostrar que se satisfacen los requisitos básicos de la edificación que establece la Ley 38/1999 de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación [6]. Estas exigencias básicas se desarrollan, entre

otros, en los Documentos Básicos entre los que destacan principalmente dos, el DB-HE0, relativo a la limitación del consumo energético de los edificios y el DB-HE1 relativo a la limitación de la demanda energética.

En la versión de marzo del 2016, la última actualización hasta la fecha, se estableció la definición de los edificios de consumo de energía casi nulo en respuesta a lo establecido en la Directiva europea 2010/31/CE. En el Documento Básico de ahorro de energía (DB-HE) [7] del CTE se establece que un edificio de consumo de energía casi nulo es un edificio “*que cumple con las exigencias reglamentarias establecidas para edificios de nueva construcción en las diferentes secciones de este Documento Básico*”. Por tanto, tan solo establece dos condiciones para que un edificio regulado por el DB-HE sea considerado de un nivel muy alto de eficiencia energética, que sea de nueva construcción y que cumpla con los requisitos recogidos en el DB-HE.

Es por este motivo que el objetivo principal de este trabajo es analizar el grado de ambición de determinados países de la Unión Europea en cuanto al diseño de los edificios de consumo de energía casi nulo, así como establecer el nivel de exigencia de la legislación española mediante el estudio de dichas normativas europeas. Finalmente, el objetivo proponer, si conviene, algunos cambios para el nuevo DB-HE, cuyas modificaciones dentro del CTE actual se harán públicas a finales de este mismo año 2018. Dichas propuestas se basarán en el análisis de los edificios de energía casi nulo de tres países que se han considerado de interés para este estudio; Francia, Alemania y Bélgica. Estos países, además de tener un clima continental asimilable al centro y norte de la península ibérica, disponen de políticas distintas entre sí pero todas ellas orientadas a mejorar la eficiencia energética de los edificios y a reducir el consumo energético de los mismos.

Este estudio comparativo entre distintos países de la Unión Europea se ciñe a edificios residenciales y se basará en un edificio en concreto diseñado para este proyecto y analizado mediante la Herramienta Unificada Lider Calener (HULC) [8]. Este programa, facilitado por el Ministerio de Fomento español, es el que permite certificar ante el organismo competencial correspondiente (en Catalunya *l’Institut Català d’Energia*, ICAEN [9]) la eficiencia energética de un edificio y además, ofrece los datos necesarios para el análisis del mismo. Por tanto, dichos datos serán el punto de partida de este estudio.

Capítulo 2

Aspectos a tener en cuenta en el estudio de eficiencia energética de un edificio.

En este capítulo analizaremos los elementos de un edificio que son más relevantes para la eficiencia energética del mismo.

2.1. Condiciones exteriores según ubicación.

Las condiciones externas a analizar en un edificio son principalmente climáticas, es decir, aspectos como la temperatura exterior, la radiación solar, la cantidad de horas de insolación del edificio y su altitud geográfica. Estas características definen las condiciones climáticas externas a que el edificio debe hacer frente con el objetivo de mantener unas condiciones agradables de humedad, temperatura, aire limpio, etc., para vivir en él y que están estandarizadas.

El DB-HE establece 12 zonas climáticas distintas que se identifican mediante una letra (de A a E) y un número (de 1 a 4); la letra indica la severidad climática del invierno (SCI) y el número indica la severidad climática del verano (SCV). La figura 2.1 muestra que los inviernos más suaves corresponden a la letra A y los más fríos a la letra E, siendo la zona climática E1 la más fría. En cuanto al verano, el número 1 indica los veranos menos cálidos y el número 4 los más cálidos, siendo la zona climática A4 la más calurosa.

SC (verano)	A4	B4	C4		E1
	A3	B3	C3	D3	
			C2	D2	
			C1	D1	
	SC (invierno)				

Figura 2.1: Zonas climáticas de España establecidas en el DB-HE según la severidad climática del invierno y del verano.

Además de la zona climática es muy importante tener en cuenta la orientación del edificio. Las fachadas orientadas a norte reciben menos horas de radiación solar por lo que es recomendable que sea la fachada con menor proporción de huecos, especialmente en los climas más fríos. En

cambio, las fachadas orientadas a sur reciben radiación solar una mayor cantidad de horas al año, por lo que la proporción de huecos puede ser considerable y se recomienda mayor cuanto más caluroso es el clima. Finalmente, los elementos de sombra exteriores, tales como edificios adyacentes o colindantes, sombras debidas al relieve o sombras propias del edificio debidas a elementos como balcones o salientes deben analizarse por su influencia sobre la envolvente del edificio. Entendemos por envolvente los elementos del edificio en contacto con el exterior, es decir, fachadas, incluyendo los huecos, y cubiertas.

Estos elementos de sombra obstaculizan e impiden que la radiación solar incida sobre la envolvente del edificio, aumentando así la demanda de calefacción del mismo y reduciendo, generalmente, la demanda de refrigeración.

2.2. Elementos constructivos: envolvente térmica y particiones interiores.

Las características de la envolvente térmica de un edificio que se deben tener en cuenta son el aislamiento, la inercia térmica, la permeabilidad al aire y su exposición a la radiación solar con el objetivo de reducir el riesgo de aparición de humedades por condensaciones superficiales e intersticiales que puedan perjudicar sus características. En el caso de las particiones interiores que no están expuestas a las condiciones climáticas exteriores sus características, principalmente de aislamiento, son menos exigentes.

La característica principal de los cerramientos es la transmitancia térmica, U , medida en unidades de $W/(m^2K)$. La transmitancia térmica es el flujo de calor que se produce a través de un elemento constructivo por unidad de área dividido por la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior del cerramiento en cuestión. La transmitancia térmica es inversa a la resistencia térmica R_T del cerramiento (m^2K/W).

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{Q}{A \cdot \Delta T} [W/m^2K] \quad (2.1)$$

Cuanto mayor es la transmitancia térmica más pérdidas de energía se producen a través del cerramiento, por lo que para evitar dichas pérdidas de energía son necesarios cerramientos con transmitancia térmica pequeña.

2.3. Huecos y puentes térmicos.

Los huecos y puentes térmicos son los puntos más débiles de la envolvente de un edificio porque reducen la estanqueidad del mismo. Los huecos son los elementos de la fachada que permiten la entrada de luz natural en el edificio, correspondientes principalmente a puertas y ventanas. Estas últimas se caracterizan por la transmitancia térmica del vidrio (y su factor solar) y la transmitancia térmica del marco. La transmitancia térmica del hueco, es decir, del conjunto vidrio y marco, es siempre mayor a la del cerramiento de la fachada por lo que conviene que la proporción de superficie de la fachada que cubren los huecos no sea muy elevada, evitando así un aumento considerable de la transmitancia térmica global de la envolvente del edificio.

Por otro lado, los puentes térmicos son los puntos de discontinuidad de la envolvente del edificio, en que la transmitancia térmica aumenta porque se reduce la estanqueidad. Son puentes térmicos las esquinas exteriores e interiores del edificio y todos los puntos de encuentro en que entran en contacto un cerramiento horizontal, un forjado o una cubierta, y un cerramiento

vertical, la fachada. Finalmente, en lo que respecta a huecos son puentes térmicos el alfeizar, los dinteles y las jambas. En la figura 2.2 se muestran algunos ejemplos de puentes térmicos.

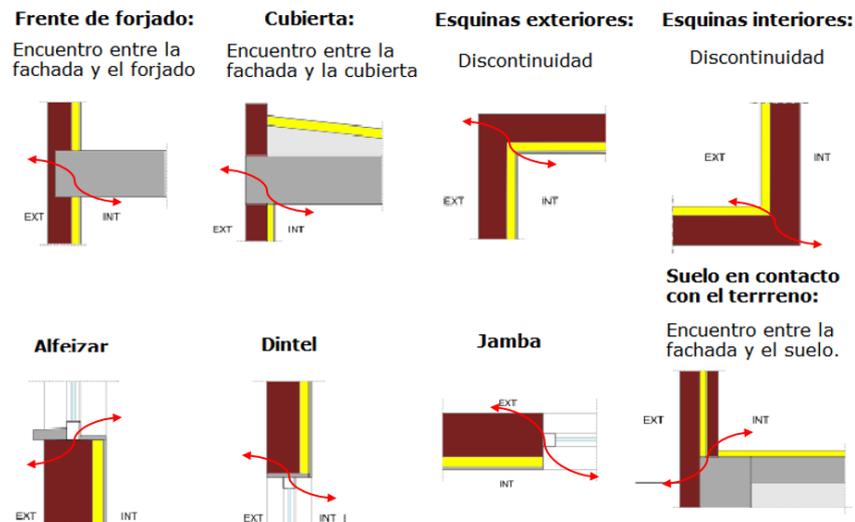


Figura 2.2: Ilustración esquemática de los principales puentes térmicos de un edificio en que la pérdida de estanqueidad favorece la transmisión de calor entre el exterior y el interior del mismo aumentando la demanda energética de calefacción.

2.4. Instalaciones de calefacción, agua caliente sanitaria y refrigeración.

En cuanto al consumo de energía de un edificio residencial, en España se tiene en cuenta el consumo de las instalaciones del mismo para calefacción, agua caliente sanitaria y refrigeración. El aumento de la eficiencia energética de estos sistemas consiste en promocionar el uso de la bomba de calor aire-aire para climatización y el uso de la bomba de calor de alta eficiencia aire-agua, es decir, el uso de la aerotermia, para calefacción y agua caliente sanitaria. Además, para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero se promociona el uso de sistemas que utilicen la energía solar, es decir, sistemas solares térmicos y sistemas fotovoltaicos, generalmente instalados en el tejado de los edificios para agua caliente sanitaria. Sin embargo cabe recordar que la energía más eficiente y que menos contamina es la no se consume, de manera que el objetivo es reducir al máximo la demanda energética del edificio para minimizar la necesidad del uso de este tipo de instalaciones.

2.5. Iluminación y ventilación

La normativa española exige y determina la eficiencia energética de las instalaciones de iluminación así como la optimización del aprovechamiento de la luz natural en edificios de uso distinto al residencial privado. Por tanto, las exigencias tanto en la demanda como en el consumo energético en iluminación no son de aplicación en un edificio residencial de nueva construcción como el que se propone estudiar.

Por otra parte, sí que se tiene en cuenta la influencia en la demanda energética de calefacción y refrigeración las ganancias y pérdidas de energía producidas por el intercambio de aire con el exterior debido a la ventilación, teniendo en cuenta las exigencias de calidad del aire de los distintos espacios de las viviendas.

Capítulo 3

Normativas europeas

3.1. España

Tal como se ha mencionado en la introducción, el DB-HE establece que un edificio de consumo de energía casi nulo es aquel que cumple con la normativa, el propio ‘DB-HE Ahorro de Energía’. En particular, los edificios residenciales de nueva construcción deben cumplir el DB-HE0, que limita el consumo de energía no renovable del edificio y el DB-HE1, que limita la demanda energética del edificio; por un lado limita la demanda energética para calefacción y por otro lado la demanda energética de refrigeración. Por tanto, el edificio debe cumplir los tres valores límites normativos.

Para el cumplimiento del DB-HE0, el consumo energético de los edificios se limita en función de la zona climática de su localidad de ubicación y del uso previsto. El consumo de energía primaria no renovable del edificio no debe superar el valor límite $C_{ep,lim}$ obtenido mediante la siguiente expresión:

$$C_{ep,lim} = C_{ep,base} + \frac{F_{ep,sup}}{S} \quad (3.1)$$

donde, $C_{ep,lim}$ es el valor límite del consumo energético de energía primaria no renovable para los servicios de calefacción, refrigeración y ACS, expresada en kWh/m²año, considerada la superficie útil de los espacios habitables;

$C_{ep,base}$ es el valor base del consumo energético de energía primaria no renovable que depende de la zona climática de invierno correspondiente a la ubicación del edificio. El valor que toma $C_{ep,base}$ según cada zona climática de invierno se establece en la tabla 3.1;

$F_{ep,sup}$ es el factor corrector por superficie del consumo de energía primaria no renovable, que toma los valores que se muestran en la tabla 3.1. Este factor es el que tiene en cuenta la geometría del edificio, realizando una corrección del límite base según la superficie S del edificio;

S es la superficie útil de los espacios habitables del edificio en m².

Tabla 3.1: Valores de $C_{ep,base}$ y $F_{ep,sup}$ en función de la zona climática de invierno.

	Valor base y factor corrector por superficie del consumo energético					
	Zona climática de invierno					
	α	A*	B*	C*	D	E
$C_{ep,base}$ [kW·h/m ² ·año]	40	40	45	50	60	70
$F_{ep,sup}$	1000	1000	1000	1500	3000	4000

* Los valores de $C_{ep,base}$ para las zonas climáticas de invierno A, B, C, D y E de Canarias, Baleares, Ceuta y Melilla se obtendrán multiplicando los valores de $C_{ep,base}$ de esta tabla por 1,2.

Para el cumplimiento del DB-HE1 la demanda energética de calefacción del edificio no debe superar el valor límite $D_{cal,lim}$ obtenido mediante la siguiente expresión:

$$D_{cal,lim} = C_{cal,base} + \frac{F_{cal,sup}}{S} \quad (3.2)$$

donde, $D_{cal,lim}$ es el valor límite de la demanda energética de calefacción, expresada en kWh/m²año, considerada la superficie útil de los espacios habitables;

$D_{cal,base}$ es el valor base de la demanda energética de calefacción, para cada zona climática de invierno correspondiente al edificio, que toma los valores de la tabla 3.2;

$F_{cal,sup}$ es el factor corrector por superficie de la demanda energética de calefacción cuyo valor se recoge también en la tabla 3.2;

S es la superficie útil de los espacios habitables del edificio, en m².

Tabla 3.2: Valores de $D_{cal,base}$ y $F_{cal,sup}$ en función de la zona climática de invierno.

Valor base y factor corrector por superficie de la demanda energética de calefacción

	Zona climática de invierno					
	α	A	B	C	D	E
$D_{cal,base}$ [kWh/m ² ·año]	15	15	15	20	27	40
$F_{cal,sup}$	0	0	0	1000	2000	3000

Para dicho cumplimiento, además, la demanda energética de refrigeración del edificio no debe superar el valor límite $D_{ref,lim} = 15$ kWh/m²año para las zonas climáticas de verano 1, 2 y 3, o el valor límite $D_{ref,lim} = 20$ kWh/m²año para la zona climática de verano 4.

3.2. Francia

En el año 2005 se modificó la normativa de regulación térmica francesa y en ella nació la etiqueta BBC (*bâtiment basse consommation*) que certificaba el estándar de edificio de bajo consumo [10]. Se otorgaba dicha etiqueta a aquellos edificios cuyo consumo primario de energía fuera de media inferior a 50 kWh/m²año.

Hoy en día, el Reglamento Térmico (RT) 2012 [11] vigente, establece el estándar de edificio de bajo consumo obligatorio para todo edificio de nueva construcción o rehabilitación de importancia. En consecuencia el consumo primario de energía se limita a 50 kWh/(m²·año) pero se pondera de acuerdo a las zonas climáticas del país y a la altitud geográfica de la ubicación del edificio. Con ello se pretende que los edificios alcancen un elevado rendimiento energético gracias a un mayor aislamiento térmico, hermeticidad y al uso de las energías renovables. La normativa distingue entre edificios residenciales y edificios del sector terciario (oficinas, escuelas, etc.) pero en este proyecto se desarrolla únicamente la normativa de edificios residenciales de nueva construcción.

Como ocurre en España, Francia también establece zonas climáticas que engloban ciudades y pueblos con climatología parecida en cuanto a la severidad climática del invierno y del verano, en concordancia con la ubicación geográfica. A grandes rasgos las zonas climáticas francesas son las que se observan en la figura 3.1 pero se debe tener en cuenta la corrección con la altitud. Se distinguen un total de 8 zonas climáticas (H) a las que se les asigna un número y una letra. El número establece la severidad climática del invierno (de 1 a 3, donde 1 indica el invierno más severo en cuanto a frío y el 3 el menos severo, es decir, invierno suave) y la letra establece la severidad climática del verano (de *a* a *d*, en que *a* indica verano suave y *d* verano caluroso). La zona climática H3 se define como el clima mediterráneo siendo la zona más calurosa del país.

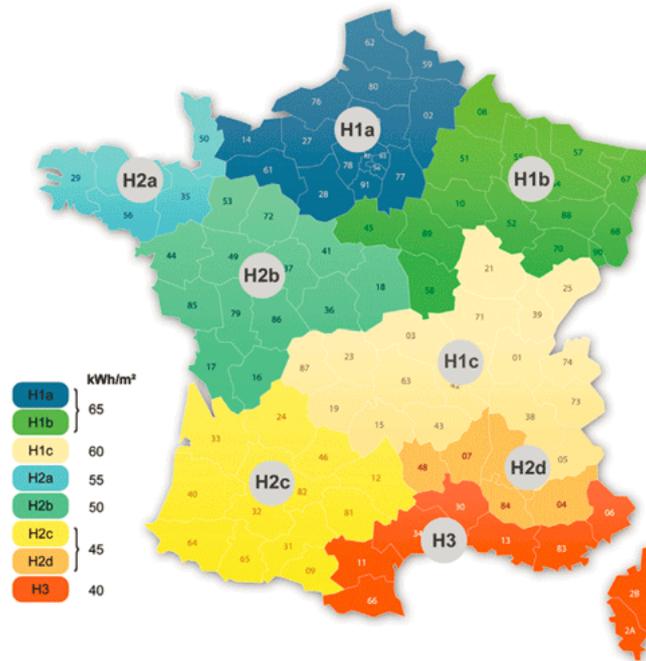


Figura 3.1: Zonas climáticas de Francia y límite de consumo de energía primaria anual para cada una de ellas (en unidades de kWh/m²año).

Tal como se observa en la figura 3.1 para cada zona climática se establece un consumo de energía primaria anual límite que se define en el RT 2012 como $C_{ep,max}$ y partir de los establecido dicha figura se pondera según la altitud, especialmente para altitudes superiores a 400m. En París, por ejemplo, el $C_{ep,max}$ se establece en 65 kWh/m² al año y este valor límite decrece para climas más cálidos en que se permite un consumo energético menor.

Este consumo de energía primaria máximo debe compararse con el consumo de energía primaria convencional del edificio, el coeficiente C_{ep} que tiene en cuenta 5 aspectos distintos del consumo energético de un edificio, la suma total de los cuales no puede superar $C_{ep,max}$.

- Calefacción
- Refrigeración
- Iluminación
- Agua caliente sanitaria (ACS)
- Ventilación

El consumo de energías renovables supone una reducción de dicho coeficiente C_{ep} por lo que el C_{ep} se calcula de la siguiente forma:

C_{ep} = consumo de energía primaria (calefacción + refrigeración + ACS + iluminación + equipos auxiliares para ventilación) - producción fotovoltaica (limitada a 12 kWh/m² anual).

La producción de energía mediante sistemas fotovoltaicos está limitada con la idea de que la reducción del consumo de energía no pueda suplirse con un aumento ilimitado del uso de energías renovables y sea por tanto consecuencia de una reducción de la demanda energética del edificio.

El RT 2012 establece otros dos valores límites normativos globales para los edificios. El primero es el requisito de eficiencia energética mínima para edificios, llamado máxima necesidad bioclimática, B_{biomax} . El B_{bio} (*Besoín Bioclimatique*, requisito bioclimático) caracteriza el requerimiento de energía de los componentes relacionados con el diseño del edificio (calefacción, refrigeración e iluminación). En consecuencia no tiene en cuenta el requerimiento energético para el ACS o la ventilación. Este indicador da cuenta de la calidad del diseño del edificio valorando el diseño bioclimático, por ejemplo, las superficies acristaladas orientadas a sur, y su aislamiento térmico independientemente del sistema de calefacción y refrigeración utilizado. El coeficiente B_{bio} , que no tienen unidades, se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$B_{bio} = 2 \cdot \text{Requisito de calentamiento} + 2 \cdot \text{Necesidad de enfriamiento} + 5 \cdot \text{Necesidad de iluminación}$$

Entendiendo como requisito la demanda energética de cada uno de estos tres ejes sin tener en cuenta el sistema implementado para cubrirla (bomba de calor, caldera de gas, etc.). Para cumplir con la normativa francesa, el coeficiente B_{bio} del edificio debe ser inferior al B_{biomax} definido por el Reglamento Térmico del 2012. Nuevamente este valor máximo se establece a partir del uso del edificio y de la zona climática ponderada según la altitud geográfica.

El segundo es un requisito sobre la temperatura interior alcanzada durante una secuencia caliente de temperaturas elevadas de 5 días. Es el denominado Tic o temperatura interior convencional que refleja la comodidad en verano. La temperatura interior de referencia convencional Tic_{ref} corresponde a la temperatura máxima alcanzada durante un período de alto calor, de manera que nuevamente para el cumplimiento, este indicador Tic del edificio debe ser inferior al de referencia, Tic_{ref} .

En consecuencia, el RT 2012 establece 3 indicadores que deben cumplirse en un edificio residencial de nueva construcción para que su consumo energético sea bajo ($C_{ep,max}$), el diseño del edificio siga las directrices del diseño bioclimático (B_{biomax}) y el confort en verano sea el adecuado al no alcanzar temperaturas superiores a Tic_{ref} . Este último indicador resulta difícil de analizar puesto que no tenemos la información necesaria para el edificio objeto de estudio, por lo que no se tratará en el análisis.

3.3. Alemania

Alemania es uno de los países pioneros de la Unión Europea en eficiencia energética de edificios. En el año 1991 nació en Alemania el concepto de casa pasiva o *Passivhaus* que combinaba un elevado confort en el interior de la vivienda con un consumo de energía muy bajo a un precio asequible, gracias al máximo cuidado de la envolvente del edificio y a un sistema de ventilación controlada. Fue a partir de esta idea que la Comisión Europea definió los edificios de consumo de energía casi nulo (NZEB). La idea de una casa pasiva es muy sencilla: optimizar los recursos existentes durante el diseño y construcción del edificio para reducir al mínimo el consumo de energía durante su uso. A ello se le añade que este consumo mínimo de energía provenga de energías renovables.

En la actualidad Alemania dispone de un amplio programa orientado a la eficiencia energética de edificios rehabilitados y de nueva construcción. Los edificios de consumo de energía casi nulo están regulados por la Ley de Ahorro de Energía (*Energieeinsparungsgesetz, EnEG*) que fue enmendada por última vez en el año 2013, junto con la Ordenanza de Ahorro de Energía (*Energieeinsparverordnung, EnEV*) en que a día de hoy está en vigor la EnEV 2016 [12]. La

EnEV regula los estándares mínimos que todos los edificios de nueva construcción deben cumplir. Como ocurre en España, debido a las normativas Europeas la EnEV deberá ser modificada para incluir los aspectos que establece la Comisión Europea. Sin embargo el recorrido de Alemania ya a día de hoy es mucho más amplio que el del caso español.

El principal incentivo utilizado para promover los edificios de menor consumo de energía son los programas de subsidio KfW que establece ayudas mediante préstamos a un interés bajo o donaciones económicas para aquellos edificios considerados eficientes. Una 'KfW Effizienzhaus' es una casa que cumple con una cierta categoría de estándares utilizados por KfW para clasificar las necesidades de energía de un edificio. La cantidad de fondos que recibirá el edificio se establece según el porcentaje de reducción en el consumo de energía final total de dicho edificio respecto al edificio de referencia (KfW Effizienzhaus 100), es decir, según el estándar de eficiencia escogido. Aunque se aplica tanto a edificios de nueva construcción como a remodelaciones de edificios existentes, el valor de las ayudas es distinta, por lo que en adelante, una vez más, nos centramos en los edificios de nueva construcción.

El estándar 'KfW Effizienzhaus' se basa en dos parámetros: las necesidades energéticas anuales del edificio (demanda de energía primaria anual del edificio, Q_P) y la cantidad de calor que se permite escapar principalmente a través de ventanas y muros exteriores poco aislados (pérdida de calor por transmisión, H_T). Los estándares mínimos que todos los edificios deben cumplir, fijados en la EnEV 2016, establecen el punto de referencia para la "KfW Effizienzhaus 100" que cumple con todos los requisitos mínimos legales. Algunos ejemplos de viviendas más eficientes que la de referencia desde el punto de vista energético son los siguientes:

- 'KfW Effizienzhaus 70': edificación que no necesita más del 70 % de la energía que necesitaría una 'KfW Effizienzhaus 100'. Eso se traduce en que consume un 30 % menos de energía primaria anual que el edificio de referencia.
- 'KfW Effizienzhaus 55': edificación que no necesita más del 55 % de la energía que necesitaría una 'KfW Effizienzhaus 100' y en consecuencia consume un 45 % menos de energía primaria anual que el edificio de referencia.
- 'KfW Effizienzhaus 40 y 40 Plus': edificación más eficiente en Alemania que no necesita más del 40 % de la energía que necesitaría una 'KfW Effizienzhaus 100' y en consecuencia consume un 60 % menos de energía primaria anual que el edificio de referencia.

En la actualidad, el KfW Bank [13] respalda la construcción energéticamente eficiente 40 Plus, 40 y 55, aunque inicialmente respaldaba las construcciones eficientes 70, 85, 100 y 115 (estos dos últimos para edificios rehabilitados) para promover la eficiencia energética y la transición hacia edificios cada vez más eficientes. Sin embargo se debe tener en cuenta que no se analiza únicamente la demanda de energía primaria sino también las pérdidas de calor del edificio. Las ayudas que ofrece para edificios residenciales de nueva construcción son las que se recogen en la tabla 3.3.

La financiación adopta la forma de subvenciones o préstamos a bajo interés que pueden combinarse con subvenciones de reembolso de préstamos. Como regla general, los incentivos financieros aumentan con el nivel de eficiencia energética alcanzado.

Tabla 3.3: Programa de construcción eficiente energéticamente: respaldo a los edificios 'KfW Effizienzhaus' en vigor desde el 1 de abril del 2016 [14]. (Tantos por ciento respecto al edificio de referencia alemán.)

KfW	Demanda de energía primaria anual (Q_P)	Pérdidas de calor (H_T)	Préstamos	Subsidios/ Subvenciones
40Plus	>40 %, edificios que generan y almacenan energía cubriendo su demanda energética	40 %	Crédito de hasta 100,000e por unidad a un interés muy bajo ($\approx 1\%$) fijo a 20 años.	Bono de reembolso del 15 % del importe del préstamo, hasta 15,000e por unidad de vivienda.
40	40 %	55 %	Crédito de hasta 100,000e por unidad a un interés muy bajo (1-2 %) fijo a 20 años.	Bono de reembolso del 10 % del importe del préstamo, hasta 10,000e por unidad de vivienda.
55	55 %	70 %	Crédito de hasta 100,000e por unidad a un interés muy bajo (1-2 %) fijo a 20 años.	Bono de reembolso del 5 % del importe del préstamo, hasta 5,000e por unidad de vivienda.

Es importante destacar que en Alemania no se utilizan las zonas climáticas diferenciadas, es decir, el nivel de exigencia no varía según las condiciones externas al no existir grandes variaciones de estas en el país. Sin embargo, los edificios residenciales requieren de una eficiencia energética distinta dependiendo de la geometría del edificio. De esta forma se compara el consumo energético del edificio con un edificio de referencia (modelo equivalente de edificio) con la misma geometría [15], principalmente teniendo en cuenta el área del mismo.

3.4. Bélgica

A principios del siglo XXI Bélgica era el país con mayor consumo energético en sus edificios, en especial la capital, Bruselas, debido a que muchos de los edificios se habían construido en la década de los 70 cuando el concepto de eficiencia energética no estaba desarrollado. Bélgica es un estado federal constituido por tres regiones, Flandes o Región Flamenca, Región Valona y Región de Bruselas. Históricamente cada una de estas regiones había tenido una normativa térmica de edificios diferenciada y había definido los conceptos y métodos de cálculo considerados apropiados según el caso. Sin embargo, desde el año 2010, se define el concepto de edificio de energía cero a nivel federal (para edificios residenciales) y requiere el cumplimiento de los requisitos de casa pasiva (concepto desarrollado en la normativa de la Región de Bruselas) y la compensación de la demanda de calefacción y refrigeración in situ por energía renovable. Puesto que la generación de energía se debe producir en el propio edificio y debe poder garantizarse dicha producción, en Bélgica el uso de la biomasa ha quedado descartado como fuente de energía renovable que pueda compensar la demanda energética de calefacción. Por tanto se establece:

- Edificio pasivo (*Passive House*):

1. La demanda total de energía para calefacción y refrigeración debe limitarse a 15 kWh/m² de área de piso acondicionado al año.
2. Durante una prueba de presurización (de acuerdo con la norma NBN EN 13829 belga) con una diferencia de presión de 50 Pa entre el interior y el exterior, la pérdida de aire no debe ser más del 60 % del volumen de la casa por hora ($n_{50} \leq 0.6/h$).

- Edificio de energía cero:

1. Cumple con las condiciones de un edificio pasivo.
2. La demanda de energía residual para la calefacción y refrigeración de espacios puede ser completamente compensada por la energía renovable producida en el edificio.

Por tanto en un edificio belga de consumo de energía cero tan solo se compensa la calefacción y refrigeración del mismo con energía renovable producida in situ y consumida en el propio edificio en que se incluyen únicamente:

- Bombas de calor de alta eficiencia: aerotermia.
- Sistemas solares térmicos.
- Placas fotovoltaicas.

A pesar de que desde el 2010 los conceptos de tipología de edificios son los mismos, la normativa y los cálculos asociados son distintos a nivel regional. La Región de Bruselas es la primera región del mundo que impulsó el estándar pasivo con el objetivo de alcanzar un elevador rendimiento energético para el año 2015 mediante la reglamentación del rendimiento energético de los edificios 2015 (PEB 2015, *Performance Énergétique des Bâtiments* [16]). Gracias a ello, ya en el año 2014 Bruselas disponía de más de un millón de metros cuadrados pasivos [17].



Figura 3.2: Regiones de Bélgica con normativa térmica de edificación diferenciada.

Tal como se observa en la figura 3.2, en Bélgica no se diferencian distintas zonas climáticas sino que la normativa varía según la región del país.

En la Región de Bruselas, para todos los edificios residenciales de nueva construcción, el uso total de energía primaria está limitado a $45 \text{ kWh/m}^2\text{año}$ para calefacción, agua caliente sanitaria y equipos auxiliares (ventiladores, bombas), excluyendo la iluminación y los electrodomésticos. La Región de Bruselas Capital ya decidió adaptar tres de esos principios para 2015.

Por tanto, nos centramos en el estudio de la normativa PEB 2015 de la Región de Bruselas Capital que limita tanto la demanda de calefacción y refrigeración ($15 \text{ kWh/m}^2\text{año}$) como el consumo para calefacción, ACS y equipos auxiliares ($45 \text{ kWh/m}^2\text{año}$).

Capítulo 4

Edificio objeto de estudio

Para este estudio, se ha diseñado un edificio de 5 plantas con 4 viviendas por planta que dispone de ascensor y un elemento común en cada planta formado por la escalera y el rellano. En la cubierta dispone de las instalaciones comunitarias. En consecuencia se trata de un edificio de 20 viviendas, que cuenta con 25 espacios habitables¹ que incluyen además de las viviendas, las zonas comunes y en que el hueco del ascensor se ha considerado un espacio no habitable en cada planta. Los sistemas constructivos considerados se detallan en el apéndice A.

Las características principales del edificio, que determinarán la demanda de calefacción y refrigeración del mismo, son las que se describen a continuación.

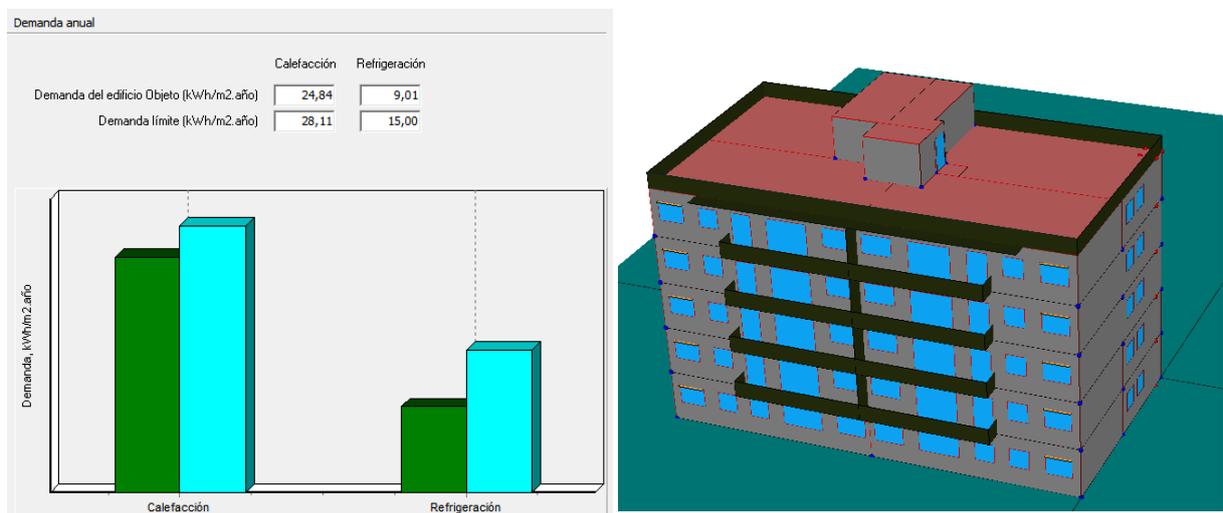
- El edificio objeto de estudio se ha considerado ubicado en el centro de la península ibérica, en que se ha seleccionado la zona climática D3, que corresponde a inviernos fríos y veranos más bien calurosos, un clima continental semejable a otros países de Europa.
- Se ha considerado un edificio aislado, por lo que no se consideran edificaciones contiguas o cercanas que puedan actuar como elementos de sombra. De esta forma todas las fachadas son exteriores y están expuestas a las condiciones climáticas de la zona.
- Se ha considerado que la fachada principal, que dispone de la puerta de acceso a la vivienda, está orientada al norte, y por tanto es la que recibe menos horas de insolación al año. Por el contrario, la fachada posterior está orientada al sur y recibirá un mayor número de horas de insolación.
- Para las ventanas se ha considerado un vidrio doble bajo emisivo de transmitancia térmica $U=1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ y con un factor solar $g=0,6$ para las ventanas orientadas al norte (fachada principal) y un factor solar $g=0,4$ para todas las demás ventanas con orientación sur (fachada posterior), orientación este y oeste (fachadas laterales).
- Para los marcos de las ventanas se han escogido marcos metálicos con rotura de puente térmico superior a 12 mm tanto para las ventanas batientes como correderas, con una transmitancia $U=3,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ y una absorptividad $\alpha=0,70$ para las ventanas batientes y una transmitancia $U=4,00 \text{ W/m}^2\text{K}$ y una absorptividad $\alpha=0,70$ para las ventanas correderas.
- La fachada se ha considerado aislada por el interior con 8 cm de lana mineral de conductividad térmica $\lambda=0,037 \text{ W/mK}$ y otros 4 cm de la misma en contacto con la placa de yeso

¹El DB-HE establece que un recinto habitable es un recinto interior destinado al uso de personas cuya densidad de ocupación y tiempo de estancia exigen unas condiciones acústicas, térmicas y de salubridad adecuadas. Para edificios residenciales un recinto habitable es acondicionado. En contrapartida, un recinto no habitable es un recinto interior no destinado al uso permanente de personas o cuya ocupación, por ser ocasional o excepcional y por ser bajo el tiempo de estancia, sólo exige unas condiciones de salubridad adecuadas.

laminado. Esta solución constructiva, de transmitancia térmica $U=0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$, genera un puente térmico importante en los frentes de forjado puesto que el forjado interrumpe el aislamiento de la fachada. Este es por tanto uno de los puntos débiles en cuanto a demanda de calefacción.

- Las cubiertas, tanto transitables como no transitables se han considerado aisladas sobre el forjado generando un puente térmico en su encuentro con la fachada, con una transmitancia térmica para ambas cubiertas $U=0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- En lo respectivo a los puentes térmicos de los huecos en estos se ha considerado que existe continuidad entre el aislamiento de la fachada y la carpintería en los alféizares, dinteles y jambas, minimizando así la conductividad de estos puentes térmicos.

Con ello, la demanda energética de calefacción del edificio es de $24,84 \text{ kWh/m}^2\text{año}$, aproximadamente un 12% inferior a la demanda energética de calefacción del edificio de referencia, que se sitúa en $28,11 \text{ kWh/m}^2\text{año}$. En cuanto a refrigeración, la demanda energética del edificio es de $9,01 \text{ kWh/m}^2\text{año}$, aproximadamente un 40% inferior en comparación con la demanda de refrigeración límite que se establece para el edificio de referencia en $15,00 \text{ kWh/m}^2\text{año}$. En la figura 4.1a se muestran estos datos tal como los recoge el programa HULC.

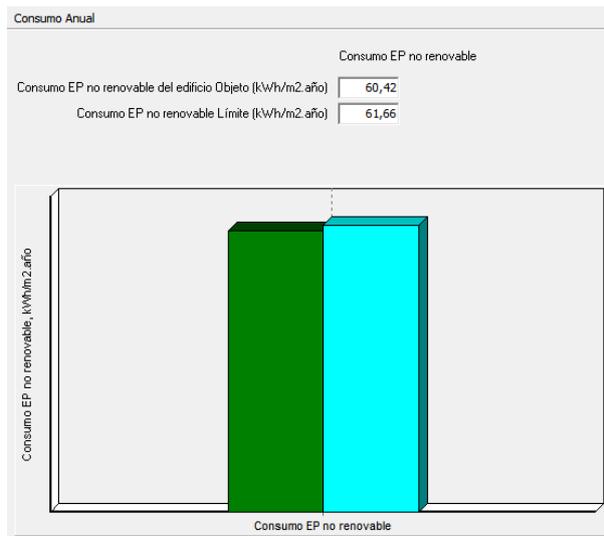


(a) Demanda energética de calefacción y refrigeración del edificio (verde) y del edificio de referencia (azul). (b) Fachada posterior con orientación sur y fachada lateral con orientación este del edificio.

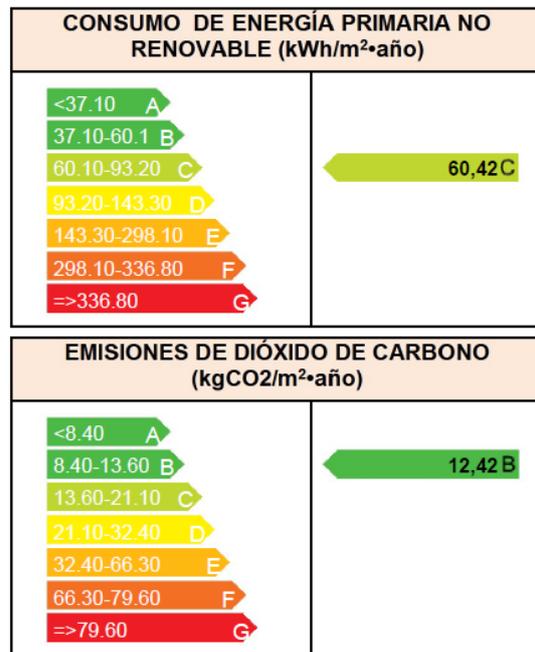
Figura 4.1: Análisis del edificio objeto de estudio a partir de la información que proporciona el programa HULC.

Finalmente, para el análisis del consumo energético se ha considerado una caldera individual de gas natural (GN) para cada vivienda con un rendimiento del 98% y en que los emisores considerados son radiadores para las estancias y radiadores toalleros para los baños. El 30% de la demanda energética de ACS está cubierta por una instalación solar, puesto que es la contribución solar mínima de fuentes renovables establecida para cubrir la demanda de ACS por el Documento Básico HE-4 del CTE.

El consumo de energía primaria no renovable del edificio se establece en $60,42 \text{ kWh/m}^2\text{año}$, un 2% inferior al límite que establece el consumo de energía primaria NR del edificio de referencia ($61,66 \text{ kWh/m}^2\text{año}$), tal como se muestra en la figura 4.2a.



(a) Consumo de energía primaria no renovable del edificio (verde) y del edificio de referencia (azul).



(b) Calificación obtenida: B en consumo de energía primaria no renovable y B en emisiones de CO₂.

Figura 4.2: Análisis del consumo energético del edificio objeto de estudio.

Debido a todas estas características, la calificación energética obtenida del edificio es *C* en consumo de energía primaria no renovable y *B* en emisiones de CO₂ (figura 4.2b), siendo considerado un edificio de consumo de energía casi nulo bajo la normativa española.

4.1. Bajo la normativa francesa

Existen dos diferencias principales entre las normativas española y francesa que regulan la eficiencia de los edificios residenciales de nueva construcción. En primer lugar, la normativa francesa establece un valor máximo del consumo de energía primaria global del edificio, que incluye el consumo de energía primaria no renovable y renovable y limita el consumo de esta última. En España, en cambio, aumentar la contribución de las energías renovables para cubrir la demanda energética de un edificio es una de las claves para mejorar en la calificación energética del mismo, puesto que tan solo se limita el consumo de energía primaria no renovable. En cuanto a demanda energética, a diferencia de lo que ocurre en España, la normativa francesa añade a la demanda energética de calefacción y refrigeración la demanda de iluminación y establece un límite (B_{biomax}) para un cálculo ponderado de las tres demandas. El DB-HE establece un límite para la demanda de calefacción, otro para la demanda de refrigeración y no analiza la demanda de iluminación.

En segundo lugar, también difieren en el estudio del consumo energético de la iluminación y de los equipos de ventilación. En España, el Código Técnico de Edificación tan solo regula los sistemas de iluminación de edificios terciarios tales como escuelas, hospitales, tanatorios, etc. pero no se establece ningún límite normativo en el consumo de iluminación en edificios residenciales. Esto es debido principalmente a la dificultad que supone prever dicho consumo en un hogar, y a la dependencia de las luminarias escogidas por cada consumidor. En Francia, en cambio, este consumo se tiene en cuenta debido a que supone un porcentaje considerable dentro del consumo energético total de una vivienda. En España, por ejemplo, este consumo

supone entre un 7 y un 10% del consumo de energía total de misma. Por otra parte, en el DB-HE la ventilación se tiene en cuenta al considerar las pérdidas de calor que supone y por tanto su afectación a la demanda de calefacción, pero no se considera el consumo energético de los equipos de ventilación. Estos son obligatorios en ambos países y su consumo durante las 8760 horas del año sí que se tiene en cuenta en la normativa francesa.

Cabe destacar que el motivo final por el que estos dos consumos energéticos no se tienen en cuenta en el DB-HE es porque resulta difícil actuar sobre ellos, es decir, no son los principales consumos que puedan ser reducidos con cierta facilidad para mejorar la eficiencia energética del edificio. En la actualidad, los sistemas de iluminación ya son muy eficientes (en especial la iluminación LED) y los equipos de ventilación, que son obligatorios, además de ser eficientes no difieren en exceso en su consumo entre modelos o marcas.

Teniendo en cuenta estos aspectos, en primer lugar establecemos el valor del indicador B_{biomax} y $C_{ep,max}$ del edificio según su ubicación geográfica y suponiendo una altitud inferior a 400m. Para ello establecemos una correlación entre la zona climática española escogida (D3) y la zona climática francesa con mayores similitudes. Puesto que se trata de un clima frío en invierno y cálido en verano se ha escogido la zona climática H1c con un consumo de energía primaria máximo de 60 kWh/m² anuales. Francia se divide en 101 departamentos, y para establecer la zona climática H1c escogemos como departamento representativo Loire. Los datos necesarios para conocer los valores máximos permitidos por el RT 2012 son los que se recogen en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Información requerida para conocer B_{biomax} y $C_{ep,max}$

Departamento	Loire
Altitud	de 0 a 400m
Tipo de edificación	Edificio residencial
Categoría de edificio	CE1
$SHON_{RT}$	1802,57 m ²
Red de calor	Sin red de calor

En Francia se distinguen dos categorías de edificios: CE1 y CE2. Los CE1 son construcciones que se pueden diseñar sin equipos de aire acondicionado para refrigeración de la vivienda, como ocurre en los edificios residenciales con baja demanda de refrigeración. Los CE2 corresponden a edificaciones con más restricciones, la mayoría de ellas del sector terciario tales como hospitales, de manera que este edificio residencial en zona climática H1c corresponde a la categoría CE1.

Otro dato relevante a tener en cuenta es el $SHON_{RT}$, que corresponde a la suma de las áreas de cada nivel de construcción restando las áreas de instalaciones sin equipos de calefacción. Para el edificio estudiado este valor es de 1802,57 m². Con todo ello, los valores máximos permitidos por el RT 2012 son los que recoge la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Valores máximos normativos

B_{biomax}	72,00 puntos
$C_{ep,max}$	60,00 kWh EP/m ² año

Pero debemos tener en cuenta que, además de estos valores límites, el diseño del edificio también debe cumplir el siguiente requisito:

- Como mínimo un $1/6$ ($\simeq 17\%$) de la superficie habitable debe ser de vidrio (proporción de la superficie acristalada de las ventanas mínima para la entrada de luz natural).

En este edificio esta proporción es del $19\% > 17\%$ por lo que cumple con las exigencias de la normativa francesa.

A continuación analizamos los indicadores del edificio: B_{bio} y C_{ep} . El indicador B_{bio} está principalmente relacionado con el concepto de demanda energética de un edificio que tenemos en España aunque incluyendo la iluminación. En consecuencia, los tres aspectos de impacto directo en este indicador son esencialmente los mismos que en cálculo de la demanda energética: la conductividad térmica de los cerramientos, principalmente paredes exteriores, teniendo en cuenta las superficies acristaladas y los puentes térmicos; el caudal de ventilación o renovaciones por hora y la captura de la radiación solar. Tal como se ha comentado anteriormente el programa HULC únicamente indica la demanda de calefacción y refrigeración (figura 4.1a), por lo que debemos obtener la de iluminación mediante otro método.

La demanda energética que supone la iluminación artificial del edificio implica un análisis más exhaustivo del edificio. Este incluye el diseño y dimensionamiento de la iluminación de las estancias de cada vivienda, tal como se realiza obligatoriamente para el interior de los edificios terciarios. En consecuencia, en este estudio realizamos un cálculo orientativo del mismo. En España el consumo energético en iluminación supone en promedio un $7,5\%$ del consumo de energía primaria total de un edificio (sin tener en cuenta el consumo de los electrodomésticos), según IDAE [18]. Suponiendo que el consumo energético de iluminación del edificio corresponde a un $7,5\%$ del total, establecemos el consumo de energía primaria para iluminación en $4,07$ kWh EP/m²año. Para considerar el caso más desfavorable y debido a que no conocemos la eficiencia de los equipos de iluminación establecemos también este valor como la demanda energética de iluminación.

Tabla 4.3: Cálculo del indicador B_{bio} del edificio.

	Demanda de energía (kWh/m ² año)	Coefficiente multiplicativo	B_{bio} (puntos)
Calefacción	24,84	x2	49,68
Climatización	9,01	x2	18,02
Iluminación	4,07	x5	16,28
Total	38,43		83,98

En la tabla 4.3 observamos que el edificio objeto de estudio no cumple la limitación de demanda de energía francesa puesto que $B_{bio}=83,98$ puntos $> B_{biomax}=72,00$ puntos.

A continuación, para establecer el C_{ep} del edificio estudiado debemos conocer los 5 consumos descritos anteriormente, de manera que seguimos el siguiente proceso:

1. Consumo de energía primaria de calefacción. Para conocer dicho consumo debemos transformar la demanda energética de calefacción en consumo de energía primaria. Francia establece la convención mostrada en la figura 4.3 al respecto.

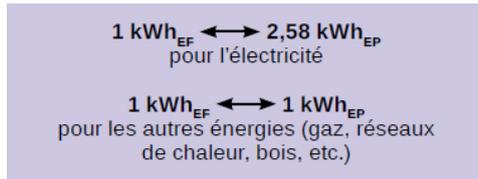


Figura 4.3: Convención adquirida en Francia para la transformación de energía primaria a energía final y viceversa.

Puesto que hemos considerado calderas de gas natural, la conversión es 1 a 1 y por tanto el consumo de energía primaria para calefacción tan solo tiene en cuenta el rendimiento de la caldera (98%), estableciendo un consumo de 25,35 kWh EP/m²año.

2. Consumo de energía primaria de refrigeración. Este edificio es de categoría CE1 por lo que no precisa de equipos de aire acondicionado y estos tampoco se han reflejado en el HULC. A diferencia de lo que ocurre en este programa, en que implementa un equipo por defecto para cubrir dicha demanda, bajo la normativa francesa el consumo de energía primaria para refrigeración es 0 kWh EP/m²año.
3. Consumo de energía primaria para ACS. A partir del consumo de energía primaria no renovable para ACS que establece el programa HULC (21,56 kWh/m²año) establecemos la demanda de energía primaria no renovable (NR) teniendo en cuenta la eficiencia de la caldera del 98% y la conversión de energía primaria NR a energía final que establece el programa (1,19). De este modo la demanda de energía primaria NR para ACS se establece en 17,76 kWh EP NR/m²año. Teniendo en cuenta que esta demanda supone el 70% de la demanda total de ACS, la demanda total de energía primaria para ACS es de 25,36 kWh EP/m²año. Para obtener el consumo de energía primaria para ACS bajo la normativa francesa, aplicamos la eficiencia del 98% a la demanda de energía primaria NR y sumamos el consumo de energía primaria renovable. En consecuencia, el consumo de energía primaria para ACS es de 25,73 kWh EP/m²año.
4. Consumo de energía primaria para iluminación artificial. Recordemos que dicho consumo no se contempla para edificios residenciales en el HULC y por tanto se ha considerado un consumo aproximado de 4,07 kWh/m²año. La iluminación consume electricidad por lo que debemos multiplicar por 2,58 para obtener el consumo de energía primaria para iluminación: 10,50 kWh EP/m²año.
5. Consumo de energía primaria de equipos auxiliares para ventilación. En Francia, como en España, la normativa en cuanto a ventilación de la vivienda establece unas renovaciones/hora de aire (o caudal de ventilación l/s) constantes para mantener las condiciones de salubridad necesarias dentro de la misma. Como consecuencia de esta ventilación la demanda de calefacción del edificio es superior, y en ambos países se tiene en cuenta. Sin embargo, la normativa francesa también tiene en cuenta el consumo del ventilador que opera las 24 horas, todos los días del año. Considerando para este edificio la instalación del ventilador OZEO Flat Auto (de la marca Soler & Palau [19]) el consumo anual del mismo es de 5,94 kWh/m²año y el consumo de energía primaria es de 15,31 kWh EP/m²año.

Por tanto, el consumo de energía primaria total del edificio es de 76,89 kWh EP/m²año, al que debemos restar el consumo de energía primaria renovable. La proporción renovable del consumo del edificio es el 30% de demanda de ACS cubierta mediante paneles solares, que corresponde a 7,61 kWh EP/m²año.

Por tanto, el consumo de energía primaria del edificio es: $C_{ep} = 69,28 \text{ kWh EP/m}^2\text{año} > 60,00 \text{ kWh EP/m}^2\text{año}$ tal como se muestra en la tabla 4.4. De este modo, el edificio diseñado para el estudio no cumple la normativa francesa RT 2012.

Tabla 4.4: Consumo de energía primaria del edificio: C_{ep} . f_{FP} es el coeficiente de transformación de energía final a energía primaria establecido por la figura 4.3.

	Fuente de energía	Consumo de energía final (kWh/m ² año)	f_{FP}	Consumo de energía primaria (kWhEP/m ² año)	Consumo EP renovable (kWhEP/m ² año)	C_{ep} (kWhEP/m ² año)
Calefacción	GN	25,35	1	25,35	-	25,35
Refrigeración	-	0,00	-	0,00	-	0,00
ACS	GN	25,73	1	25,73	7,61	18,12
Iluminación	Elect.	4,07	2,58	10,50	-	10,50
Ventilación	Elect.	5,94	2,58	15,31	-	15,31
Total	-	61,08	-	76,89	7,61	69,28

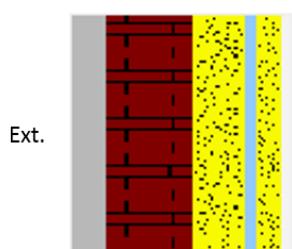
4.1.1. Cambios necesarios en el edificio para cumplir la normativa francesa

Para reducir dicho consumo y alcanzar el cumplimiento de la normativa francesa llevaremos a cabo una serie de actuaciones orientadas esencialmente a disminuir la demanda de calefacción y a aumentar el consumo de energías renovables sin modificar los equipos. En primer lugar, adecuamos el edificio a un modelo de construcción más parecido al francés, puesto que este está más orientado a alcanzar la calificación de edificio de bajo consumo. Para ello ponemos el foco principalmente en las ventanas, en particular en las balconeras del salón de cada vivienda. En Francia las grandes balconeras no son habituales porque suponen un aumento considerable de la demanda de calefacción y cuanto mayor es el área del vidrio, más difícil es reducir su transmitancia térmica y asegurar su estanqueidad. Además, el uso de balconeras correderas tampoco es habitual, principalmente porque la estanqueidad de estas es peor que el de las batientes. En consecuencia, sustituimos las balconeras correderas iniciales de dimensiones 2,50x2,20m por balconeras batientes de 2,00x2,20m. Por último, el diseño de balcones tampoco es tan común como en España, por lo que los eliminamos en ambas fachadas, reduciendo la demanda de calefacción en invierno al aumentar la superficie que recibe radiación solar pero aumentando la demanda de refrigeración en verano. Con todo ello el consumo de calefacción tan solo se reduce un 4,7% y alcanza un consumo de energía primaria para calefacción de 24,15 kWh EP/m²año.

Por otro lado, y siguiendo las directrices de muchos municipios y ciudades españolas, aumentamos la contribución de las energías renovables, puesto que es una buena forma de alcanzar el cumplimiento y contribuir a la sostenibilidad del medio ambiente. Puesto que en Francia se establece un máximo de 12 kWh EP/m²año de consumo en energías renovables, aumentamos la contribución de paneles solares hasta el 47,3%, maximizando el uso permitido de dichas energías renovables. Con ello el consumo de energía primaria del edificio es $C_{ep} = 63,68 \text{ kWh EP/m}^2\text{año}$ y se reduce así un 8% respecto al C_{ep} inicial recogido en la tabla 4.4.

Finalmente actuamos sobre la envolvente del edificio. La fachada es el elemento cuya transmitancia térmica tiene mayor repercusión en la demanda de calefacción del edificio debido a su gran superficie. Por este motivo modificamos el cerramiento de la fachada, pasando de una fachada con aislamiento por el interior de 8 cm que genera un puente térmico considerable, a una fachada aislada por el exterior con 10 cm de aislamiento tal como se muestra en la figura 4.4.

1. Fachada aislada por el interior del muro.



De exterior a interior:

Revestimiento exterior de 5 cm de mortero.

Ladrillo perforado de ½ pie de 13cm de espesor.

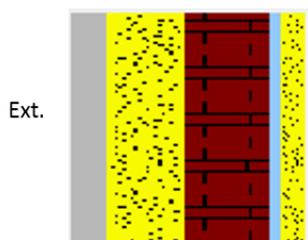
Int. 8 cm de lana mineral de conductividad 0,037 W/mK.

Cámara de aire sin ventilar de 2cm.

4 cm de lana mineral de conductividad 0,037 W/mK.

Placa de yeso laminado de 1,5cm.

2. Fachada aislada por el exterior del muro



De exterior a interior:

Revestimiento exterior de 5 cm de mortero.

10 cm de lana mineral de conductividad 0,034 W/mK.

Int. Ladrillo perforado de ½ pie de 13 cm de espesor.

Cámara de aire sin ventilar de 2cm.

4 cm de lana mineral de conductividad 0,037 W/mK.

Placa de yeso laminado de 1,5cm.

Figura 4.4: Elementos constructivos de la fachada considerada para el cumplimiento de la normativa española y francesa.

Con ello la transmitancia térmica de la fachada pasa de $U=0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$ a $U=0,21 \text{ W/m}^2\text{K}$, y la conductividad térmica del puente térmico asociado al encuentro entre la fachada y el forjado pasa de $0,79 \text{ W/mK}$ a $0,08 \text{ W/mK}$. Este segundo tipo de fachada es el más común para climas fríos en que es necesario además de una transmitancia térmica baja la mitigación de los puentes térmicos asociados a la fachada, principalmente el encuentro entre forjado y muro pero también las esquinas y los huecos de fachada.

De esta forma el indicador C_{ep} se reduce en un 4,6% y por tanto el consumo de energía primaria del edificio es $C_{ep}=59,83 \text{ kWh EP/m}^2\text{año} \leq 60,00 \text{ kWh EP/m}^2\text{año}$. Esto es suficiente para el cumplimiento de la normativa francesa de manera que el edificio es considerado de bajo consumo (BBC), tal como muestra la tabla 4.5.

Tabla 4.5: Cumplimiento del consumo de energía primaria del edificio (C_{ep}). f_{FP} es el coeficiente de transformación de energía final a energía primaria establecido por el RT 2012 en la figura 4.3.

	Fuente de energía	Consumo de energía final (kWh/m ² año)	f_{FP}	Consumo de energía primaria (kWhEP/m ² año)	Consumo EP renovable (kWhEP/m ² año)	C_{ep} (kWhEP/m ² año)
Calefacción	GN	20,30	1	20,30	-	20,30
Refrigeración	-	0,00	-	0,00	-	0,00
ACS	GN	25,71	1	25,71	12,00	13,71
Iluminación	Elect.	4,07	2,58	10,50	-	10,50
Ventilación	Elect.	5,94	2,58	15,31	-	15,31
Total	-	61,08	-	76,89	7,61	59,83

Sin embargo, estas soluciones propuestas no cumplen $B_{bio} \leq B_{biomax}$, puesto que la demanda de calefacción se reduce aproximadamente un 19,9% alcanzando un valor de $19,89 \text{ kWh/m}^2\text{año}$ y la demanda de refrigeración aumenta ligeramente hasta $9,36 \text{ kWh/m}^2\text{año}$. Con ello se alcanzan

los 74,78 puntos del indicador $B_{bio} > 72,00$ puntos límite que establece B_{biomax} . Por lo tanto, para cumplir las exigencias de la normativa francesa es necesario reducir todavía más la demanda de calefacción del edificio, que supondrá un pequeño aumento de la demanda de refrigeración pero que deberá ser compensada por una disminución significativa de la primera.

Para reducir la demanda energética de calefacción la primera modificación realizada consiste en mejorar la transmitancia térmica de los vidrios propuestos en un inicio. Para ello podemos optar por un vidrio doble bajo emisivo de transmitancia térmica $U=1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ o por una doble ventana más sencilla con la misma transmitancia térmica global. Con ello la demanda de calefacción se reduce a $18,76 \text{ kWh/m}^2\text{año}$ (un 5,7%), insuficiente todavía para el cumplimiento de B_{biomax} . Por consiguiente, es necesario analizar otras medidas de reducción de la demanda de calefacción.

Una de las medidas recomendadas consiste en mejorar el aislamiento de la cubierta. La superficie de la cubierta representa un 30% de la superficie de la fachada. Sin embargo, un buen aislamiento de esta beneficia notablemente la reducción de la demanda y además equipara el consumo de las viviendas de la última planta con las demás viviendas de plantas más bajas, puesto que las primeras, al estar más expuestas al exterior, tienen generalmente un consumo mayor. Con esta medida aumentamos dos centímetros el aislamiento de cubierta para alcanzar una transmitancia térmica $U=0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$, reduciendo además el puente térmico entre el muro de fachada y el forjado de cubierta. Esto nos permite reducir la demanda energética de calefacción a $18,54 \text{ kWh/m}^2\text{año}$, una reducción del 1,2%, nuevamente insuficiente.

Analizando nuevamente el edificio se propone mejorar la transmitancia térmica de los marcos de las ventanas. Los marcos más eficientes son los de PVC, puesto que es un material con reducida conductividad térmica. Los marcos de PVC para ventanas batientes alcanzan transmitancias térmicas de $1,30 \text{ W/m}^2\text{K}$. Sin embargo estos marcos encarecen mucho el precio de la obra y su utilización es limitada. En general es la última opción a considerar. Sin embargo, existen marcos metálicos con mejor transmitancia térmica que el marco considerado para las ventanas batientes en un inicio. En concreto instalamos marcos de aluminio para ventanas abisagradas (batientes) con transmitancia térmica $U=3,10 \text{ W/m}^2\text{K}$, consiguiendo una mejora del 3% en cada ventana pero que supone una reducción de la demanda de calefacción de 0,5%, $18,44 \text{ kWh/m}^2\text{año}$. En este caso el indicador B_{bio} es de 71,96 puntos $\leq 72,00$ puntos alcanzando así el cumplimiento (tabla 4.6).

Tabla 4.6: Cálculo del indicador B_{bio} del edificio con las mejoras realizadas.

	Demanda de energía ($\text{kWh/m}^2\text{año}$)	Coficiente multiplicativo	B_{bio} (puntos)
Calefacción	18,44	x2	36,88
Climatización	9,40	x2	18,80
Iluminación	4,07	x5	16,28
Total	31,91		71,96

Con estas características el $C_{ep}=58,35 \text{ kWh/m}^2\text{año}$ y por tanto el edificio cumple el RT 2012. Los valores alcanzados se presentan en la tabla 4.7.

Tabla 4.7: Cumplimiento del Reglamento Térmico 2012 francés.

B_{bio} (puntos)	B_{biomax} (puntos)	C_{ep} (kWh EP/m ² año)	$C_{ep,max}$ (kWh EP/m ² año)
71,96	72,00	58,35	60,00

Respecto al edificio inicial proyectado, que cumplía la normativa española y que por tanto era un edificio de consumo de energía casi nulo para España, las modificaciones realizadas para alcanzar el cumplimiento de la normativa francesa siendo considerado así un edificio de bajo consumo son:

- Reducción de la demanda energética de calefacción en un 25,8 %.
- Como consecuencia de dicha reducción en la demanda de calefacción, aumento de la demanda de refrigeración en un 4,1 %.
- Ninguna modificación en la demanda energética para iluminación.

Esto pone de manifiesto las grandes diferencias entre ambas normativas.

4.2. Bajo la normativa alemana

La principal diferencia de la normativa alemana con la española y francesa es que la primera no diferencia zonas climáticas con condiciones externas distintas y además no establece un límite en el consumo de energía primaria, tan solo en la demanda.

- Requisito de energía primaria anual $Q_P \leq 0,75 \cdot Q_{P,REF}$. Esta incluye todas las pérdidas del portador de energía (generación, transporte, etc.) y la generación de calor (conversión, almacenamiento, distribución, etc.)
- Pérdida de calor por transmisión $H'_T \leq H'_{T,REF}$. Pérdidas de energía del edificio a través de la envolvente del mismo.

Los valores de referencia se obtienen a partir del ratio A/V_e que establece la proporción entre la superficie de transferencia de calor con el exterior (A) y el volumen de construcción calentado. Con ello se tiene en cuenta la geometría del edificio para establecer los valores máximos permitidos.

En el edificio objeto de estudio, el volumen de construcción que dispone de sistema de calefacción son las 20 viviendas, cuyo volumen total es de 2046 m³. El área de transferencia de calor con el exterior corresponde al área de fachada y de cubierta de todo el edificio, que supone en total de 1596 m². En consecuencia, el ratio A/V_e obtenido es 0,78. Para un edificio residencial aislado como el del estudio se establece $H'_{T,REF}=0,50$ W/m²K y $Q_{P,REF} = 113,12$ kWh/m²año obtenido a partir de la siguiente expresión:

$$Q_{P,REF} = 50,74 + 75,29 \cdot \frac{A}{V_e} + \frac{2600}{(100 + A_N)} \quad (4.1)$$

Donde $A_N=0,32m^{-1}V_e$. Por tanto, los valores límite que el edificio no debe superar son los que se muestran en la tabla 4.8.

Tabla 4.8: Valores máximos normativos

$H'_{T,REF}$	0,50 W/m ² K
$Q_{P,REF}$	84,84 kWh/m ² año

Por tanto, a continuación calculamos H'_T y Q_P . H'_T del edificio se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$H'_T = \frac{H_T [W/K]}{A [m^2]} \quad (4.2)$$

Donde H_T corresponde a la transmisión de calor global del edificio. Para su cálculo se tiene en cuenta la transmisión de calor de las ventanas, incluyendo vidrios y marcos, los puentes térmicos y la transmitancia térmica de fachadas, cubiertas, etc. Cada coeficiente de transmitancia térmica U se multiplica por el área que ocupa dicho elemento para obtener la transmisión de calor en unidades de W/K. Para el edificio de referencia $H_T=792,35$ W/K. Al dividir por el área correspondiente a la superficie de transferencia de calor ($A=1596$ m²), el valor de H'_T obtenido es 0,50 W/m²K, por lo que cumple con la normativa alemana que hace referencia a la envolvente térmica del edificio.

Para obtener Q_P aplicamos la fórmula que se describe en la EnEV 2016:

$$Q_P = Q_{H,E} \cdot f_{p_i} + Q_{TW,E} \cdot f_{p_i} + Q_{L,E} \cdot f_{p_i} + Q_{aux} \cdot f_{p_i} \quad (4.3)$$

Donde $Q_{H,E}$ es la demanda de energía final de calefacción;

$Q_{TW,E}$ es el consumo final de energía para ACS;

$Q_{L,E}$ es el consumo de energía final para ventilación;

Q_{aux} es el consumo de los equipos auxiliares;

f_{p_i} es el factor de energía primaria asociado.

Para el edificio estudiado estos valores han sido calculados en el caso anterior y se recogen en la tabla 4.9. Los valores del factor de energía primaria asociado son distintos a los de la normativa francesa y española. El factor relativo a la electricidad supone un cambio importante respecto a España y Francia debido al mix energético alemán que es considerado más "eficiente".

Tabla 4.9: Valores obtenidos para el cálculo de Q_P

	kWh/m ² año	fpi	Q_P kWh/m ² año
$Q_{H,E}$	25,35	1,1	27,88
$Q_{TW,E}$ (70 % GN)	18,12	1,1	19,93
$Q_{TW,E}$ (30 % ER)	7,61	1,0	7,61
$Q_{L,E}$	5,94	1,8	10,68
Total	57,01	-	66,10

Ambos valores son menores que el valor de referencia establecido por la normativa alemana. Sin embargo el edificio no cumple con todos los requisitos del mismo, principalmente porque es más estricto que la normativa española en cuanto a la transmitancia térmica de los elementos principales: ventanas, fachada y cubiertas. Los valores límites establecidos por la normativa alemana son los siguientes [20]:

- U_W ventanas $\leq 1,0$ W/m²K. (vidrio)
- U cubiertas $\leq 0,20$ W/m²K.
- U fachadas $\leq 0,28$ W/m²K.

El edificio no cumple con la transmitancia térmica límite de ventanas ni cubiertas, pero sí de fachadas. La EnEV 2016 establece una transmitancia térmica máxima de 1,00 W/m²K para los vidrios de ventanas y en la práctica estos valores se alcanzan con ventanas de doble vidrio bajo

emisivos en que se sustituye la cámara de aire por cámara con gas argón ($U=1,00\text{W/m}^2\text{K}$) o mediante ventanas de triple vidrio. Actualmente en Alemania es muy común el uso del triple vidrio, debido a su menor transmitancia térmica que supone un aumento significativo del aislamiento térmico y por su mayor aislamiento acústico. Sin embargo, esto supone un aumento del grosor de la ventana y un encarecimiento del proyecto. Para el cumplimiento de la normativa y con el objetivo de mejorar la eficiencia térmica del edificio, sustituimos las ventanas del proyecto inicial por ventanas con triple acristalamiento. Escogemos triples vidrios presentes en el mercado con las siguientes características: para las ventanas y balconeras con orientación norte $U=0,60\text{ W/m}^2\text{K}$ y factor solar $g=0,51$; para las ventanas y balconeras con orientación sur: $U=0,60\text{ W/m}^2\text{K}$ y factor solar $g=0,38$.

Para el cumplimiento de la transmitancia térmica de cubiertas tan solo es necesario aumentar el aislamiento de XPS 2 cm, alcanzando un grosor de material aislante de 12 cm con una transmitancia térmica de cubierta $U=0,20\text{ W/m}^2\text{K}$.

4.2.1. Cambios necesarios en el edificio para alcanzar el estándar de ‘KfW Effizienzhaus 55’

Puesto que se consigue el cumplimiento de la normativa alemana vamos a considerar el KfW-55 el objetivo de nuestro edificio. El estándar KfW-55 es la exigencia mínima para alcanzar una subvención o préstamo dado que la normativa alemana actual establece que estos edificios son de bajo consumo. En consecuencia, los requisitos que el edificio debe cumplir son los que se establecen en la tabla 4.10.

Tabla 4.10: Exigencias para los edificios KfW considerados de bajo consumo que optan a subvención.

KfW-Effizienzhaus	40 Plus	40	55	55 Ref.-Werte
Q_P in % $Q_{P,REF}$	40	40	55	-
H'_T in % $H'_{T,REF}$	55	55	70	-
Zusätzliche Anforderung	Plus Paket	-	-	Ref.-Werte

Esto supone los límites mostrados en la tabla 4.11 para el estándar ‘KfW Effizienzhaus 55’:

Tabla 4.11: Valores máximos para el estándar ‘KfW Effizienzhaus 55’

$H'_{T,REF}$	$0,35\text{ W/m}^2\text{K}$
$Q_{P,REF}$	$62,21\text{ kWh/m}^2\text{año}$

Como en el caso de Francia, adecuamos la arquitectura al modelo alemán principalmente porque está encarada a una mejora de la eficiencia energética del edificio. Para facilitar la comparativa realizamos los mismos cambios que en caso francés: eliminamos las balconeras correderas, reducimos su tamaño y eliminamos los balcones.

Con la realización de estos cambios, en que se incluyen las mejoras en cubiertas y vidrios para el cumplimiento de la normativa EnEV 2016, la demanda de energía final de calefacción se reduce en un 25,2% ($18,96\text{ kWh/m}^2\text{K}$) respecto al edificio inicialmente diseñado ($25,35\text{ kWh/m}^2\text{K}$) por lo que obtenemos:

- $H'_T = 0,47\text{ W/m}^2\text{K} > H'_{T,REF} = 0,35\text{ W/m}^2\text{K}$

- $Q_P = 59,08 \text{ kWh/m}^2\text{año} \leq Q_{P,REF} = 62,21 \text{ kWh/m}^2\text{año}$.

De esta forma se obtiene un Q_P inferior al máximo exigido ($Q_{P,REF}$) pero la transmisión de calor global del edificio obtenida es mayor que $H'_{T,REF}$.

Para alcanzar dicho objetivo es necesario nuevamente actuar sobre el puente térmico entre la fachada y el forjado aislando la fachada por el exterior de un modo similar al de la figura 4.4. En este caso modificamos la fachada manteniendo un aislamiento de 8 cm pero por el exterior del ladrillo, de manera que las pérdidas térmicas del puente térmico inicial de 0,79 W/mK se reduce a 0,09 W/mK. Cabe destacar que no son necesarios 10 cm de aislamiento exterior, como sí ocurría para el cumplimiento de la normativa francesa, puesto que no necesitamos mejorar la transmitancia térmica de la fachada. De esta manera se alcanza el cumplimiento de la exigencia de edificio de bajo consumo alemán ‘KfW Effizienzhaus 55’ (tabla 4.12).

Tabla 4.12: Cumplimiento de la normativa EnEV 2016 alemana

H'_T (W/m ² K)	$H'_{T,REF}$ (W/m ² K)	Q_P (kWh/m ² año)	$Q_{P,REF}$ (kWh/m ² año)
0,33	0,35	55,97	62,21

Nuevamente, comparamos con el edificio inicial proyectado y describimos las modificaciones realizadas para alcanzar el cumplimiento de la normativa alemana de edificio de bajo consumo ‘KfW Effizienzhaus 55’:

- Reducción de la demanda energética de calefacción en un 36,4 %.
- Mejoras considerables en la envolvente del edificio: uso de triple vidrio en ventanas, mayor aislamiento térmico en cubierta y fachada aislada por el exterior.
- Ninguna modificación en la demanda energética para ventilación.

Sin duda se muestran grandes diferencias con la normativa española y también francesa, especialmente en la demanda energética de calefacción del edificio; la demanda que permite cumplir la normativa alemana es inferior a la requerida para el cumplimiento del DB-HE y el RT 2012.

4.3. Bajo la normativa belga

A continuación vamos a aplicar la normativa PEB 2015 de Bruselas al edificio objeto de estudio. En Bélgica no se establecen límites por diseño del edificio, superficie, volumen o zona climática, sino dos valores límite energéticos iguales para todo edificio de nueva construcción en la Región de Bruselas. Estos requisitos son:

- La demanda total de energía para calefacción (BNC) debe limitarse a 15 kWh/m²año.
- El consumo de energía primaria no renovable debe ser menor a 45 kWh/m²año para calefacción, agua caliente sanitaria y equipos auxiliares (ventiladores, bombas), excluyendo la iluminación y los electrodomésticos y a ella puede sumarse hasta 15 kWh/m²año de consumo de energía renovable.

Para el edificio de referencia los valores de demanda y consumo son los que se muestran en la tabla 4.13 teniendo en cuenta el factor de conversión de energía final a energía primaria establecido por la normativa PEB 2015 [21].

Tabla 4.13: Demanda de calefacción y consumo de energía primaria del edificio.

	Energía final (kWh/m ² año)	Factor de con- -versión a EP	Energía primaria (kWh/m ² año)	Energía límite (kWh/m ² año)
Consumo de calefacción	25,35	1	25,35	-
Consumo de ACS NR	18,12	1	18,12	-
Consumo ventilación	5,94	2,5	14,84	-
Consumo total NR	49,40	-	58,30	45,00
Consumo de ACS R	7,61	1	7,61	15,00
Demanda de calefacción	-	-	24,84	15,00

Como en los casos anteriores, el edificio no cumple tampoco con la normativa belga y para alcanzar una demanda de energía tan baja necesitamos recurrir a gran parte de las mejoras que se han desarrollado para el cumplimiento de las normativas anteriores.

4.3.1. Cambios necesarios en el edificio para cumplir la normativa de Bruselas PEB 2015

En primer lugar adecuamos el edificio a una estructura más apropiada para reducir la demanda de calefacción, del mismo modo que en los dos casos anteriores. Con ello la demanda de calefacción se reduce a 23,67 kWh/m²año.

A continuación analizamos las transmitancias térmicas máximas permitidas por la PEB 2015:

- $U_{W,max} = 1,80 \text{ W/m}^2\text{K}$. La transmitancia térmica máxima de la ventana tiene en cuenta el valor promedio ponderado de las superficies de marco y vidrio y sus respectivas transmitancias térmicas y establece un valor límite al conjunto. Esto implica, para el edificio estudiado, una transmitancia térmica del vidrio $U_{max}=1,40 \text{ W/m}^2\text{K}$ y una transmitancia térmica del marco $U_{max}=3,20 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- U_{max} cubiertas = $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- U_{max} fachadas = $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Puesto que la transmitancia térmica de las cubiertas del edificio es $U=0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$, cumplen con la normativa belga, pero no así la fachada ($U=0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$) ni las ventanas. Para el cumplimiento de la transmitancia térmica de fachada realizamos el cambio recogido en la figura 4.4 alcanzando una $U=0,21 \text{ W/m}^2\text{K}$ y modificamos la transmitancia térmica del vidrio a $U=1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$, que implica el uso de doble vidrio bajo emisivo de menor transmitancia térmica global que el considerado inicialmente ($U=1,60 \text{ W/m}^2\text{K}$). Esto supone una reducción de la demanda de calefacción del 21,2% respecto a la demanda de 23,67 kWh/m²año. Sin embargo, es insuficiente para el cumplimiento ($18,65 \text{ kWh/m}^2\text{año} > 15,00 \text{ kWh/m}^2\text{año}$).

Para alcanzar el objetivo y reducir la demanda a un máximo de 15 kWh/m²año, la opción más eficaz consiste en optar por el triple vidrio aplicado para cumplir la normativa alemana. Con una transmitancia térmica $U=0,60 \text{ W/m}^2\text{K}$ reduce la demanda de calefacción a 14,90 kWh/m²año (un 20,1% respecto a los vidrios con transmitancia $U=1,40 \text{ W/m}^2\text{K}$). Sin embargo, aunque el edificio cumple el requisito de la demanda de calefacción no cumple el requisito de consumo de energía primaria no renovable ($48,16 \text{ kWh/m}^2\text{año} > 45,00 \text{ kWh/m}^2\text{año}$). En consecuencia es necesario aumentar la contribución solar para cubrir la demanda de ACS, del 30% establecido inicialmente a un 41,9% para cumplir la normativa de Bruselas (tabla 4.14).

Tabla 4.14: Demanda de calefacción y consumo de energía primaria del edificio bajo el cumplimiento de la normativa PEB 2015 con el factor de conversión a energía primaria que determina dicha normativa [21].

	Energía final (kWh/m ² año)	Factor de con- -versión a EP	Energía primaria (kWh/m ² año)	Energía límite (kWh/m ² año)
Consumo de calefacción	15,20	1	15,20	-
Consumo de ACS NR	14,95	1	14,95	-
Consumo ventilación	5,94	2,5	14,84	-
Consumo total NR	36,09	-	44,99	45,00
Consumo de ACS R	10,78	1	10,78	15,00
Demanda de calefacción	-	-	14,90	15,00

En comparación con el edificio inicialmente proyectado, las modificaciones que ha sido necesario realizar para el cumplimiento de *Passive House* que establece la normativa de Bruselas para edificios de nueva construcción son:

- Reducción de la demanda energética de calefacción en un 60 %.
- Mejoras considerables en la envolvente del edificio con el uso de triple vidrio en ventanas y la fachada aislada por el exterior mejorando tanto la transmitancia térmica de la fachada inicial como la estanqueidad eliminando el puente térmico con el forjado.
- Aumento de la contribución de energía solar para cubrir el consumo de ACS del 11,9 %.

Esta es la normativa más estricta de las que se han analizado y se centra principalmente en reducir drásticamente la demanda energética de calefacción del edificio.

Capítulo 5

Conclusiones

Del estudio realizado podemos extraer las siguientes conclusiones:

1. En primer lugar cabe destacar la disparidad de métodos de análisis de la eficiencia energética de los edificios que existen en las distintas normativas europeas. Las 4 normativas estudiadas parten de conceptos comunes pero el análisis es totalmente distinto en cada una de ellas. Un claro ejemplo es el consumo energético en iluminación. La normativa francesa es la única que tiene en cuenta dicho consumo en edificios residenciales de nueva construcción con ponderación 5 para el análisis del indicador B_{bio} , con el objetivo de que se maximice el aprovechamiento de la luz natural. Sin embargo, parece más razonable establecer una superficie mínima acristalada en la fachada del edificio, análisis que también realiza el Reglamento Térmico 2012, que analizar un consumo que es difícil de sistematizar en viviendas residenciales como es el consumo de iluminación.

Por otra parte, el consumo de los equipos auxiliares para ventilación es considerado en todas las normativas excepto en la española, a pesar de que el CTE exige la instalación de equipos de ventilación forzada en las viviendas para garantizar las condiciones adecuadas de salubridad. Este es uno de los aspectos a mejorar que se debería considerar para el nuevo reglamento, para promover así una mayor eficiencia de estos equipos que reduzca su consumo.

Viendo estas diferencias, el primer paso que debería llevar a cabo la Comisión Europea es encontrar un método efectivo de evaluación de la eficiencia energética de los edificios común para todos los países, estableciendo qué demandas y consumos son más relevantes y sobre cuáles se debe actuar con mayor contundencia.

2. En el estudio realizado, el valor común que nos permite realmente establecer una comparativa entre las distintas normativas es la demanda energética de calefacción alcanzada en cada caso para cumplir con las exigencias de cada país. En la figura 5.1 se evidencia que la normativa española es la menos exigente de las normativas europeas estudiadas. Junto a la normativa belga, estas son las únicas normativas que limitan específicamente dicha demanda y la diferencia es más que significativa. El valor límite de la demanda energética de calefacción para el edificio estudiado es, según el DB-HE, de 28,11 kWh/m²año, y según el PEB 2015, 15 kWh/m²año. Esto supone que la demanda energética de calefacción permitida por la normativa belga es un 47% inferior al valor límite establecido por la normativa española.

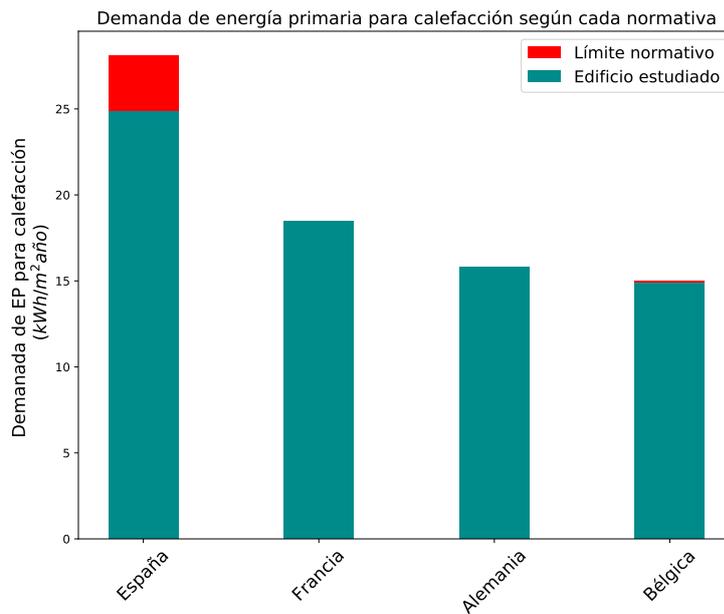


Figura 5.1: Comparativa que muestra la demanda de energía primaria para calefacción del edificio para el cumplimiento de la normativa de cada país estudiado.

En el caso de Francia y Alemania, a pesar de que dicha demanda no está limitada, si lo está la suma de esta con otras demandas o consumos, siendo en ambos casos el valor de la demanda de energía primaria para calefacción del edificio estudiado inferior a la del edificio que cumple con el DB-HE.

Por tanto, se puede concluir que el límite establecido por el DB-HE para la demanda de calefacción del edificio es demasiado alto, sobretodo sabiendo que el edificio adquiere la consideración de NZEB.

3. En tercer lugar cabe destacar que, además de los valores límites exigidos de demanda energética y consumo de energía, también se han mostrado diferencias en las transmitancias térmicas máximas permitidas para ventanas, fachadas y cubiertas, siendo la normativa española las más laxa en comparación con las otras 3 normativas europeas analizadas, tal como se muestra en la comparativa del apéndice B.

En el estudio hemos analizado dos modelos de normativa opuestos en cuanto a “concepto”; por un lado una normativa muy exigente en cuanto a transmitancias térmicas de fachadas, cubiertas y ventanas principalmente, que además analiza la mitigación de los puentes térmicos, pero en cambio, su exigencia en cuanto al consumo y la demanda energética es inferior. Se trata de la normativa alemana EnEV 2016, cuando no se analizan edificios de bajo consumo. En este caso, tal como hemos visto, el edificio diseñado inicialmente cumplía con Q_P . Por otro lado, hemos analizado una normativa cuyas exigencias para las transmitancias y puentes térmicos son inferiores, pero en cambio, la exigencia de demanda energética es superior, tal como ocurre con la normativa francesa.

A estas dos normativas se añade la normativa belga, que es la más exigente globalmente porque conjunta unos elevados límites de transmitancia térmica y una demanda energética

permitida muy reducida, en contraposición a la normativa española que consecuentemente es la menos exigente. Por tanto, el DB-HE no debe únicamente aumentar su nivel de exigencia en la demanda energética sino también en puentes térmicos y transmitancias térmicas.

4. Tal como se ha detallado, la normativa PEB 2015 y RT 2012 establecen un límite para el consumo de energía primaria renovable con el objetivo de evitar que se supla la menor eficiencia energética del edificio con un elevado consumo de energías renovables. La energía que menos contamina es la que no se consume, y por ello el objetivo principal es reducir tanto como sea posible la demanda energética del edificio. En última instancia, el objetivo es que dicha demanda mínima sea suplida mediante energías renovables. Sin embargo dicho límite se establece para el cálculo de los distintos indicadores, en la práctica, el edificio puede consumir únicamente energía de fuentes renovables pero estas no disminuyen las exigencias del edificio.

Por tanto, dicha medida es considerada útil y eficaz en la actualidad, y debe servir de puente hacia los edificios de consumo de energía casi nula. Esta limitación no está considerada en el DB-HE que establece un mínimo para el consumo de energía renovable para ACS pero no establece ningún máximo para el cálculo de $C_{ep,lim}$. Sin embargo, en el futuro, dicha restricción carecerá de sentido porque la demanda energética del edificio permitida será mínima y deberá suplirse exclusivamente mediante fuentes de energía renovable.

5. Finalmente, respecto al diseño del edificio estudiado, se ha mostrado que en el clima continental considerado, en que la demanda de calefacción tiene un peso claramente superior a la de refrigeración, son eficaces las medidas de reducción de ventanas correderas y como norma general, grandes ventanales, como también la disminución de grandes balcones que impidan una mayor superficie sobre la que incida la radiación solar. También es de gran importancia un correcto aislamiento de la fachada y de la cubierta y sobre todo, la resolución de los puentes térmicos más significativos. Principalmente la mayor eficiencia se consigue atendiendo al diseño bioclimático, es decir, analizando la orientación del edificio, la exposición a las condiciones climáticas adversas, etc.

En definitiva, se ha establecido que las exigencias de la normativa española distan mucho de ser las necesarias para la consideración de edificios de consumo de energía casi nulo. Dicha normativa debe aumentar sus exigencias tanto en la demanda energética límite permitida como en el consumo así como las exigencias en las transmitancias térmicas de la envolvente del edificio y en particular en los puentes térmicos, cuya exigencia debería ser, como mínimo, la mitigación del puente térmico entre la fachada y el forjado. Por último, debería incluir un análisis que establezca límites en cuanto a la proporción de ventanas y si es necesario, siempre mediante un estudio previo, ofrecer incentivos o ayudas a aquellos edificios más eficientes, siguiendo el modelo de la normativa alemana, para que exista una transición real hacia edificios de consumo de energía casi nula.

Bibliografía

- [1] [eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex %3A32009L0028](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex%3A32009L0028) [12.07.2018]
- [2] ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-directive/national-energy-efficiency-action-plans [12.07.2018]
- [3] ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Consumption_of_energy#Further_Eurostat_information [13.07.2018]
- [4] [eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex %3A32010L0031_information](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex%3A32010L0031_information) [12.07.2018]
- [5] www.codigotecnico.org/index.php/menu-que-cte/menu-presentacion.html [15.07.2018]
- [6] www.fomento.es/NR/rdonlyres/BD585BC1-504E-4A7C-A3AB-6B44EC44167C/115200/Ley_Edificacion_consolidada.pdf [13.07.2018]
- [7] Documento Básico de Ahorro de Energía, 29 Junio 2018, Ministerio de fomento: www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/DccHE.pdf [14.07.2018]
- [8] www.codigotecnico.org/index.php/menu-recursos/menu-aplicaciones/282-herramienta-unificada-lider-calener [13.07.2018]
- [9] icaen.gencat.cat/es/energia/usos_energia/edificis/certificacio/ [13.07.2018]
- [10] www.rt-batiment.fr/fileadmin/documents/RT2012/06_07_2010_-_generalisation_des_batiments_a_basse_consommation.pdf [14.07.2018]
- [11] www.rt-batiment.fr/batiments-neufs/reglementation-thermique-2012/presentation.html [15.07.2018]
- [12] www.enev-online.com/enev_praxishilfen/vergleich_enev_2016_enev_2014_neubau_wohn_bau_15.04.06.htm [18.07.2018]
- [13] www.kfw.de/KfW-Konzern/ [15.07.2018]
- [14] KfW: Bank aus Verantwortung. *Improvements to the KfW Energy-Efficient Construction programme on 1 April 2016.* www.kfw.de/KfW-Group/Newsroom/Aktuelles/Pressemitteilungen/Pressemitteilungen-Details_344640.html [19.07.2018]
- [15] www.gbpn.org/databases-tools/bc-detail-pages/germany#undefined [18.07.2018]
- [16] Vade-mecum réglementation travaux PEB 2015: Guide des exigences et des procédures de la réglementation Travaux PEB en Région de Bruxelles-Capitale. [12.07.2018]
- [17] Brussels Builds Greener: conception and passive house standard; caviar.archi/brussels-builds-greener-conception-passive-house-standard/ [19.07.2018]

- [18] www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Documentacion_Basica_Residencial_Unido_c93da537.pdf [08.07.2018]
- [19] www.solerpalau.com/es-es/vmc-ozeo-flat-auto-1850-serie/ ⇒ Ficha técnica del ventilador Ozeo Flat Auto: statics.solerpalau.com/media/import/documentation/ES_OZEO-FLAT-AUTO.pdf [28.06.2018]
- [20] www.inoutic.de/fr/conseils-pour-l-039achat-de-fenetres/economiser-l-039energie/decret-pour-l-039economie-d-039energie-2014/decret-pour-leconomie-denergie-2014.html [01.07.2018]
- [21] energie.wallonie.be/fr/03-10-facteur-de-conversion-en-energie-primaire.html?IDC_PEB=9491&IDD=113516&IDC=9090 [28.06.2018]

Apéndice A

Sistemas constructivos del edificio diseñado para el cumplimiento del DB-HE

En este apéndice se detallan los sistemas constructivos de los elementos exteriores necesarios para el cumplimiento del DB-HE del edificio objeto de estudio, teniendo en cuenta la zona climática en que se ubica el mismo, D3. La transmitancia térmica es el valor más importante de dichos cerramientos juntamente con la estructura de su composición, en especial si el aislamiento es exterior (es decir, continuo) o interior (discontinuo).

Fachada

El elemento más importante del edificio es su fachada, puesto que es la mayor superficie expuesta a las condiciones exteriores. La fachada diseñada, cuya composición se muestra en la tabla A.1, tiene una transmitancia térmica $U=0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Tabla A.1: Fachada con aislamiento interior y $U=0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Nº	Material	Espesor	Conductividad	Densidad	Cp	Res.Térmica
1	Mortero de cemento o cal para albañilería y	0,050	1,000	1525	1000	
2	1/2 pie LP métrico o catalán 80 mm < G <	0,130	0,512	900	1000	
3	MW Lana mineral [0.037 W/[mK]]	0,080	0,037	40	1000	
4	Cámara de aire sin ventilar vertical 2 cm					0,170
5	MW Lana mineral [0.037 W/[mK]]	0,040	0,037	40	1000	
6	Placa de yeso laminado [PYL] 750 < d < 900	0,015	0,250	825	1000	

Cumple con la normativa española porque la transmitancia térmica máxima establecida por el DB-HE1 para evitar descompensaciones es $U=0,60 \text{ W/m}^2\text{K}$. Además, la transmitancia orientativa que establece el apéndice E del DB-HE1 para el cumplimiento de las exigencias energéticas del mismo, en vivienda de obra nueva, es $U=0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$, por lo que se considera adecuado el valor establecido ($U=0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Cubiertas

El segundo sistema constructivo de importancia es la cubierta, debido a su destacable superficie en contacto con el exterior y a que a que su correcto aislamiento evita las diferencias de demanda energética entre las viviendas del piso superior con cubierta y las viviendas de pisos

inferiores. Se distinguen dos tipos de cubiertas, la cubierta transitable, apta como terraza, y la cubierta no transitable, utilizada para instalaciones o colectores solares.

Tabla A.2: Cubierta transitable con $U=0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$

Nº	Material	Espesor	Conductividad	Densidad	Cp	Res.Térmica
1	Plaqueta o baldosa cerámica	0,010	1,000	2000	800	
2	Mortero de cemento o cal para albañilería y	0,040	1,000	1525	1000	
3	Impactodan	0,005	0,040	27	800	
4	Betún fieltro o lámina	0,005	0,230	1100	1000	
5	HormiÓN celular curado en autoclave d 300	0,070	0,090	300	1000	
6	XPS Expandido con dióxido de carbono CO2 [	0,100	0,034	38	1000	
7	FR Entrevigado de hormiÓN -Canto 350 mm	0,350	1,995	1610	1000	
8	Cámara de aire sin ventilar horizontal 2 cm					0,160
9	Placa de yeso laminado [PYL] 750 < d < 900	0,015	0,250	825	1000	

Tabla A.3: Cubierta no transitable con $U=0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$

Nº	Material	Espesor	Conductividad	Densidad	Cp	Res.Térmica
1	Arena y grava [1700 < d < 2200]	0,050	2,000	1450	1050	
2	Subcapa fieltro	0,002	0,050	120	1300	
3	Mortero de cemento o cal para albañilería y	0,050	1,000	1525	1000	
4	Betún fieltro o lámina	0,005	0,230	1100	1000	
5	Mortero de cemento o cal para albañilería y	0,050	1,000	1525	1000	
6	HormiÓN celular curado en autoclave d 300	0,070	0,090	300	1000	
7	XPS Expandido con dióxido de carbono CO2 [	0,080	0,034	38	1000	
8	FR Entrevigado de hormiÓN -Canto 350 mm	0,350	1,995	1610	1000	

Ambas cubiertas tienen la misma transmitancia térmica, $U=0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$. En consecuencia, cumplen con la normativa del DB-HE1, que establece la transmitancia térmica máxima para evitar descompensaciones en $U=0,40 \text{ W/m}^2\text{K}$. Según el apéndice E del DB-HE1, para el cumplimiento de las exigencias energéticas del mismo, la transmitancia térmica orientativa para las cubiertas, en viviendas de obra nueva, es $U=0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Solera: cerramiento en contacto con el terreno

El tercer elemento exterior de mayor superficie es la solera, el cerramiento en contacto con el terreno que corresponde al suelo de la planta baja del edificio. Este cerramiento no está expuesto a las condiciones externas sino a las condiciones del suelo, que son menos extremas y sin cambios bruscos en cuanto a su temperatura.

Tabla A.4: Solera con $U=0,42 \text{ W/m}^2\text{K}$

Nº	Material	Espesor	Conductividad	Densidad	Cp	Res.Térmica
1	Tableros de fibras incluyendo MDF 350 < d <	0,020	0,140	450	1700	
2	Fonpex	0,003	0,037	30	800	
3	Mortero de cemento o cal para albañilería y	0,070	1,000	1525	1000	
4	XPS Expandido con dióxido de carbono CO2 [	0,060	0,034	38	1000	
5	HormiÓN armado 2300 < d < 2500	0,150	2,300	2400	1000	
6	Arena y grava [1700 < d < 2200]	0,200	2,000	1450	1050	

La transmitancia térmica máxima establecida por el DB-HE1 para suelos en contacto con el terreno es $U=0,60 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Finalmente, recogemos los cerramientos interiores considerados y su cumplimiento del DB-HE1. Estos cerramientos, que no están en contacto con el exterior, tienen una menor repercusión en la demanda energética del edificio, pero su importancia no es despreciable.

Cerramientos interiores verticales.

Tabla A.5: Divisoria entre viviendas ($U=0,38 \text{ W/m}^2\text{K} < U_{max}=1,20 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Nº	Material	Espesor	Conductividad	Densidad	Cp	Res.Térmica
1	Placa de yeso laminado [PYL] 750 < d < 900	0,015	0,250	825	1000	
2	MW Lana mineral [0.037 W/[mK]]	0,040	0,037	40	1000	
3	1/2 pie LP métrico o catalán 80 mm < G <	0,130	0,512	900	1000	
4	MW Lana mineral [0.037 W/[mK]]	0,040	0,037	40	1000	
5	Placa de yeso laminado [PYL] 750 < d < 900	0,015	0,250	825	1000	

Tabla A.6: Divisoria entre vivienda y hueco ascensor ($U=0,42 \text{ W/m}^2\text{K} < U_{max}=0,85 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Nº	Material	Espesor	Conductividad	Densidad	Cp	Res.Térmica
1	Mortero de cemento o cal para albañilería y	0,015	1,000	1525	1000	
2	1/2 pie LP métrico o catalán 80 mm < G <	0,130	0,512	900	1000	
3	MW Lana mineral [0.037 W/[mK]]	0,070	0,037	40	1000	
4	Placa de yeso laminado [PYL] 750 < d < 900	0,015	0,250	825	1000	

Tabla A.7: Divisoria vivienda y pantalla ascensor ($U=0,72 \text{ W/m}^2\text{K} < U_{max}=0,85 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Nº	Material	Espesor	Conductividad	Densidad	Cp	Res.Térmica
1	Hormigón armado 2300 < d < 2500	0,200	2,300	2400	1000	
2	MW Lana mineral [0.037 W/[mK]]	0,040	0,037	40	1000	
3	Placa de yeso laminado [PYL] 750 < d < 900	0,015	0,250	825	1000	

Tabla A.8: Divisoria entre vivienda y rellano escalera ($U=0,38 \text{ W/m}^2\text{K} < U_{max}=0,85 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Nº	Material	Espesor	Conductividad	Densidad	Cp	Res.Térmica
1	Hormigón armado 2300 < d < 2500	0,200	2,300	2400	1000	
2	MW Lana mineral [0.037 W/[mK]]	0,040	0,037	40	1000	
3	Placa de yeso laminado [PYL] 750 < d < 900	0,015	0,250	825	1000	

Cerramientos interiores horizontales.

Tabla A.9: Forjado entre viviendas ($U=0,94 \text{ W/m}^2\text{K} < U_{max}=1,20 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Nº	Material	Espesor	Conductividad	Densidad	Cp	Res.Térmica
1	Tableros de fibras incluyendo MDF 350 < d <	0,020	0,140	450	1700	
2	Fonpex	0,010	0,037	30	800	
3	Mortero de cemento o cal para albañilería y	0,070	1,000	1525	1000	
4	FR Entrevigado de hormión aligerado -Canto	0,350	1,890	1515	1000	
5	Cámara de aire sin ventilar horizontal 2 cm					0,160
6	Placa de yeso laminado [PYL] 750 < d < 900	0,015	0,250	825	1000	

Tabla A.10: Forjado entre vivienda y rellano escalera ($U=0,94 \text{ W/m}^2\text{K} < U_{max}=0,85 \text{ W/m}^2\text{K}$)

	Material	Espesor	Conductividad	Densidad	Cp	Res.Térmica
1	Tableros de fibras incluyendo MDF 350 < d <	0,020	0,140	450	1700	
2	Fonpex	0,020	0,037	30	800	
3	Mortero de cemento o cal para albañilería y	0,070	1,000	1525	1000	
4	FR Entrevigado de hormión aligerado -Canto	0,350	1,890	1515	1000	
5	Cámara de aire sin ventilar horizontal 10 cm					0,180
6	Placa de yeso laminado [PYL] 750 < d < 900	0,015	0,250	825	1000	

Tabla A.11: Forjado rellanos escalera ($U=1,10 \text{ W/m}^2\text{K} < U_{max}=1,20 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Nº	Material	Espesor	Conductividad	Densidad	Cp	Res.Térmica
1	Plaqueta o baldosa de gres	0,008	2,300	2500	1000	
2	Mortero de cemento o cal para albañilería y	0,060	1,000	1525	1000	
3	Impactodan	0,010	0,040	27	800	
4	FR Entrevigado de hormión aligerado -Canto	0,350	1,890	1515	1000	
5	Cámara de aire sin ventilar horizontal 10 cm					0,180
6	Placa de yeso laminado [PYL] 750 < d < 900	0,015	0,250	825	1000	

Apéndice B

Comparativa de la fachada y los huecos considerados para el cumplimiento de la normativa de cada país.

Para que el edificio cumpla con la normativa de cada país ha sido necesario modificar la fachada del mismo. En la tabla B.1 se establece una comparativa de la misma.

Tabla B.1: Resumen de las medidas aplicadas a la fachada para el cumplimiento de cada normativa

	España	Francia	Alemania	Bélgica
Tipología de fachada	Aislada por el interior	Aislada por el exterior	Aislada por el exterior	Aislada por el exterior
Transmitancia térmica U (W/m ² K)	0,25	0,21	0,25	0,21
Puente térmico (W/mK)	0,79	0,08	0,09	0,08

En los huecos se producen grandes pérdidas térmicas principalmente porque su transmitancia es mayor que la transmitancia de los elementos opacos en los que se encuentran (esencialmente la fachada). En consecuencia, sus características son de gran influencia en la demanda energética del edificio. En la tabla B.2 se recogen las características de los huecos que se han determinado para el cumplimiento del edificio de las distintas normativas estudiadas. Los valores de los factores solares (g) varían según la composición del vidrio y se han considerado valores de g existentes en el mercado.

Tabla B.2: Resumen de las medidas aplicadas a los huecos exteriores para el cumplimiento de cada normativa

	España	Francia	Alemania	Bélgica
Tipología de ventana	Correderas y bat.	Batientes	Batientes	Batientes
Tipología de vidrio	Doble bajo emisivo	Doble bajo emisivo	Triple vidrio	Triple vidrio
Vidrio (U en W/m ² K)	1,60	1,40	0,60	0,60
Marcos metálicos (U en W/m ² K)	Correderas; 4,00 Batientes: 3,20	3,10	3,20	3,20
Factor solar norte	0,60	0,60	0,51	0,51
Factor solar sur	0,40	0,40	0,38	0,38