



Universitat
de les Illes Balears

TESI DOCTORAL

2016

Programa de Doctorat de Física

**ANÁLISIS DE LA ENERGÍA CONSUMIDA Y LAS
EMISIONES DE CO₂ DURANTE EL CICLO DE
VIDA DE EDIFICIOS DEL SECTOR TERCIARIO Y
RESIDENCIAL SITUADOS EN LAS ISLAS
BALEARES**

Beatriz Rosselló Batle

Director: Dr. Andreu Moià Pol

Director: Dr. Víctor Martínez Moll

Tutor: Dr. Eduard Cesari Aliberch

Doctora per la Universitat de les Illes Balears

A mi madre

Agradecimientos

Quisiera agradecer a mis Directores de Tesis la confianza que han depositado en mí y su ayuda incondicional en el desarrollo de este trabajo.

Quisiera agradecer a la *Conselleria d'Economia, Hisenda i Innovació del Govern de les Illes Balears* por haber financiado el proyecto “*Millora de la sostenibilitat ambiental dels edificis hotelers mitjançant l'anàlisi del seu cicle de vida*” del cual se han podido aprovechar la experiencia y los datos para una parte del análisis llevado a cabo.

Quisiera agradecer también a mis compañeros de la Universidad, en especial a Ramón y a Carlos, su compañerismo y sus ganas de compartir sus conocimientos conmigo.

Quisiera agradecer a mi familia y a mis amigos su paciencia y su compañía.

Por último, quisiera agradecer a la Universidad y al Departamento de Física por las oportunidades que me ha proporcionado en estos años.

Resumen

Los objetivos de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, en el marco del Protocolo de Kioto, han provocado la aparición de reglamentaciones de obligado cumplimiento en el sector de la edificación. Una selección de los materiales de construcción desde el punto de vista de su energía cautiva y del ciclo de vida del edificio, permitiría reducir los impactos medioambientales asociados a los edificios. En este estudio, se ha llevado a cabo el análisis de la energía consumida y las emisiones de CO₂ durante el ciclo de vida de edificios del sector terciario y residencial situados en las Islas Baleares.

En la primera parte del estudio, se han analizado las emisiones de CO₂ a lo largo del ciclo de vida de una serie de edificios hoteleros. En este análisis, se ha observado que las emisiones de CO₂ de la fase operacional suponen entre el 80% y el 90% de las emisiones totales a lo largo de su ciclo de vida. Se ha observado, además, que las emisiones de CO₂ asociadas a los materiales en la fase de construcción suponen entre el 87% y el 98% de las emisiones de esta fase del ciclo de vida, siendo el tanto por ciento restante el correspondiente a los procesos de construcción del edificio. El estudio se ha complementado con una estimación del factor de emisión de CO₂ asociado a la generación eléctrica en Baleares y se ha observado que su valor es muy superior al correspondiente a la generación eléctrica peninsular y que su variación en un periodo temporal de 15 años es escasa.

En la segunda parte del estudio, se ha analizado la fase de construcción de un edificio educativo de grandes dimensiones. En esta parte del análisis, se ha observado que la energía cautiva inicial (IEE) y las emisiones de CO₂ (IECO₂) asociadas a los forjados estructurales de hormigón armado son 2,7 y 3,3 veces superiores a los correspondientes a forjados de madera con las mismas características estructurales. En esta parte del análisis se ha hecho, además, una propuesta de escenarios de reducción. Entre los escenarios evaluados, se ha observado que la sustitución de los forjados de hormigón por forjados estructurales de madera, junto con la sustitución del pavimento de terrazo por un pavimento de linóleo y la sustitución de los marcos de aluminio anodizado por marcos de madera de pino, en el edificio analizado, evitaría la emisión de 4100 tCO₂ a la atmósfera con un incremento del presupuesto del 2%.

En la tercera parte del estudio, se ha llevado a cabo una evaluación de la demanda energética y la variación del valor de IEE en viviendas, llevando a cabo una conversión de su tipología y mediante la modificación de la composición de las fachadas, el tipo de aislamiento utilizado, la tipología de cubierta y los marcos de las ventanas. Se han definido un total de 98 subescenarios que han sido evaluados y comparados. Entre los resultados obtenidos, se ha observado que la sustitución de los marcos de madera por marcos de aluminio lacado provoca incrementos en el consumo de calefacción para un

tiempo de vida de 50 años y un incremento de la energía cautiva hasta 4 veces mayor. La última parte del trabajo se presenta como un complemento al análisis llevado a cabo en viviendas. En esta parte, se ha realizado una caracterización de puentes térmicos presentes en las viviendas evaluadas, y se han analizado las variaciones de los valores de demanda energética observados al incorporar en la Herramienta Unificada LIDER-CALENER, los valores de transmitancia térmica lineal calculados con THERM.

Resum

El objectiu de reducció de les emissions de gasos d'efecte hivernacle, en el context del Protocol de Kioto, han provocat l'aparició de reglamentacions d'obligat compliment dins del sector de l'edificació. Una selecció dels materials de construcció, des del punt de vista de la seva energia embeguda i del cicle de vida de l'edifici, permetrien reduir els impactes mediambientals associats als edificis. En aquest estudi, s'ha dut a terme un anàlisi de l'energia consumida i de les emissions de CO₂ en el cicle de vida d'edificis del sector terciari i residencial de les Illes Balears.

En la primera part de l'estudi, s'han analitzat les emissions de CO₂ al llarg del cicle de vida d'una sèrie d'edificis hotelers. En aquest anàlisi, s'ha observat que les emissions de CO₂ de la fase d'utilització suposen entre el 80% y el 90% de les emissions totals al llarg del seu cicle de vida. A més, s'ha observat, que les emissions de CO₂ associades als materials en la fase de construcció suposen entre el 87% y el 98% de les emissions en aquesta fase del cicle de vida, essent el tant per cent restant el corresponent als processos de construcció de l'edifici. L'estudi s'ha complementat amb una estimació del factor d'emissió de CO₂ associat a la generació elèctrica a Balears i s'ha observat que el seu valor és molt superior al corresponent a la generació elèctrica peninsular, i que la seva variació temporal en un període de 15 anys és menyspreable.

En la segona part de l'estudi, s'ha analitzat la fase de construcció d'un edifici educacional de grans dimensions. En aquesta part de l'anàlisi, s'ha observat que la energia embeguda inicial (IEE) i les emissions de CO₂ (IECO₂) associades als forjats estructurals de formigó armat són 2,7 y 3,3 vegades majors que les corresponents a forjats de fusta amb les mateixes característiques estructurals. A més, s'ha fet una proposta d'escenaris de reducció. Entre els escenaris avaluats, s'ha observat que la substitució dels forjats de formigó per forjats estructurals de fusta, juntament amb la substitució del paviment de terratzo per un paviment de linòleum i la substitució dels marcs d'alumini anoditzat per marcs de fusta, a l'edifici analitzat, evitaria l'emissió de 4100 tCO₂ a l'atmosfera amb un increment del presupost del 2%.

En la tercera part de l'estudi, s'ha dut a terme una avaluació de la demanda energètica i la variació del valor de IEE a habitatges. S'ha considerat una conversió de la seva tipologia i la modificació de la composició de les façanes, el tipus d'aïllament emprat, la tipologia de cobertes i els marcs de les finestres. S'han definit un total de 98 subescenaris que han estat avaluats i comparats. Entre els resultats obtinguts, s'ha observat que la substitució dels marcs de fusta per marcs d'alumini lacat provoca increments en el consum de calefacció, per un temps de vida de 50 anys, i un increment de l'energia embeguda fins a 4 vegades major. La darrera part del treball, es presenta com a complement de l'anàlisi dut a terme en habitatges. En aquesta part, s'ha realitzat una caracterització de ponts tèrmics dels habitatges avaluats i s'han analitzat les variacions de la demanda energètica en utilitzar els valors obtinguts amb l'eina THERM, dins de l'Eina Unificada LIDER-CALENER feta servir per a les simulacions.

Abstract

The reduction of greenhouse gas emissions, in the framework of the Kyoto Protocol, has led to the emergence of regulations to be applied in the building sector. The selection of construction materials from a life cycle perspective and taking into account their embodied energy, would reduce the environmental impacts associated with buildings. In this study, an assessment of the energy consumption and the CO₂ emissions during the life cycle of residential and tertiary buildings in the Balearic Islands, was carried out.

In the first part of the study, CO₂ emissions were assessed throughout the life cycle of a sample of hotel buildings. In this evaluation, it was observed that the CO₂ emissions from the operational phase represented between 80% and 90% of the total emissions throughout the entire buildings lifecycle. Moreover, it was observed that the embodied CO₂ emissions represented between 87% and 98% of the emissions obtained for the construction phase, being the remaining percentage for the construction processes. The study was supplemented by an estimation of the CO₂ emissions factor associated with electricity generation in the Balearic Islands, which showed a scarce variation over a period of time of 15 years.

In the second part of the study, the construction phase of a large educational building was assessed. In this analysis, it was observed that the initial embodied energy and CO₂ emission values for structural timber floors were 2,7 and 3,3 times lower than those for reinforced concrete floors. In this part of the assessment, a proposal of scenarios was made, and it was observed that replacement of structural concrete floors by timber floors, together with replacement of terrazzo flooring by linoleum and replacement of anodized aluminium frames by pine wood frames, avoided the emission of 4100 tCO₂ to the atmosphere, with a budget increase near 2%.

In the third part of the study, an assessment of embodied and thermal energy demands was carried out in dwellings. In this analysis, 92 sub-scenarios were proposed taking into consideration the building typology and different facades, roofing systems and window frames. The results showed that the replacement of wooden frames by lacquered aluminium ones caused increases of heating consumption and increases of the embodied energy 4 times greater. The fourth part of the study is presented as a supplement to the analysis carried out in dwellings. In this part, a characterization of thermal bridges and the variations of thermal energy demand values were assessed, taking into account the linear thermal transmittance values obtained with THERM and those included in the Unified Tool LIDER-CALENER, used for the assessment.

Lista de acrónimos y abreviaturas

ACV: Análisis de Ciclo de Vida;

BESTEST: Test de simulación energética en edificios (*Building Energy Simulation Test*);

CDD: Grados día de enfriamiento (*Cooling Degree Days*);

COP: Coeficiente de rendimiento de una máquina frigorífica en modo calefacción (*Coefficient of Performance*);

CTE: Código Técnico de la Edificación;

DA DB-HE: Documento de Apoyo al Documento Básico HE de Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación;

EER: Coeficiente de eficiencia energética de una máquina frigorífica en modo refrigeración (*Energy Efficiency Ratio*);

EPS: Poliestireno expandido (*Expanded polystyrene*);

GEI: Gases de efecto invernadero;

HDD: Grados día de calefacción (*Heating Degree Days*);

HU: Herramienta Unificada LIDER-CALENER;

IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.

IEA: Agencia Internacional de la Energía (*International Energy Agency*);

IEE: Energía embebida o cautiva inicial (*Initial Embodied Energy*);

ITeC: Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña;

LC: Ladrillo cerámico;

MW: Lana mineral (*Mineral Wool*);

PUR: Poliuretano (*Polyurethane*);

PVC: Policloruro de vinilo (*Polyvinyl Chloride*);

XPS: Poliestireno extruido (*Extruded Polystyrene*).

Índice general

Parte I . Introducción, objetivos y metodología.	17
Introducción.....	18
Estado del Arte	20
Objetivos.....	26
Metodología.....	27
1) Análisis de la energía cautiva y las emisiones de CO ₂ asociadas	27
2) Análisis de la demanda energética	28
3) Análisis de los puentes térmicos	29
Parte II . Resultados, discusión y conclusiones.	30
Resultados.....	31
Capítulo 1 . Análisis de las emisiones de CO ₂ durante el ciclo de vida de edificios hoteleros situados en las Islas Baleares.	32
Objetivos.....	32
Metodología.....	32
Resultados.....	35
Capítulo 2 . Análisis de medidas de reducción de la energía cautiva inicial y sus emisiones de CO ₂ asociadas en un edificio educativo de grandes dimensiones situado en las Islas Baleares.	70
Objetivos.....	70
Metodología.....	70
Resultados.....	72
Capítulo 3 . Análisis de la relación entre la demanda energética y la energía cautiva en edificios residenciales situados en las Islas Baleares.....	88
Objetivos.....	88
Metodología.....	88
Resultados.....	110
Capítulo 4 . Análisis de puentes térmicos lineales de encuentro de frentes de forjado con fachadas.	131
Objetivos.....	131
Metodología.....	131

Resultados.....	134
Discusión	150
Conclusiones.....	152
Referencias	156
Anexos	168
Anexo I. Lista de publicaciones	168
Anexo II. Tablas complementarias del Capítulo 1	169
Anexo III. Tablas complementarias del Capítulo 3	174

Índice de Figuras

Figura 1.1. Masa de los materiales básicos por m ² de superficie construida.	36
Figura 1.2. Masa por m ² de superficie construida de los capítulos definidos en la fase de construcción.....	37
Figura 1.3. Participación de los materiales y los procesos constructivos a las emisiones de CO ₂ totales de la fase de construcción.....	37
Figura 1.4. IECO ₂ por m ² de superficie construida.	38
Figura 1.5. Emisiones de CO ₂ por m ² de superficie construida de aquellos materiales específicos que contribuyen en más de un 5% a las IECO ₂ totales en alguno de los tres hoteles analizados.	39
Figura 1.6. Consumo energético de una muestra de 31 hoteles situados en las Islas Baleares.	41
Figura 1.7. Escenario de variación del consumo energético de los hoteles 1 y 2 propuesto para el análisis.....	43
Figura 1.8. Consumo de energía primaria para producción de energía eléctrica en Baleares.	57
Figura 1.9. Consumo de energía renovable para producción eléctrica en Baleares.	57
Figura 1.10. Emisiones de CO ₂ durante la fase operacional de los hoteles 1 y 2.....	67
Figura 1.11. Balance global a lo largo del ciclo de vida de las emisiones de CO ₂ de los hoteles 1 y 2.....	69
Figura 2.1. IEE de todas las unidades de obra en el caso de estudio analizado.	72
Figura 2.2. Participación en la IEE y las IECO ₂ de los 13 sistemas constructivos con una contribución conjunta del 75% a la IEE del edificio.	73
Figura 2.3. Sección de los forjados: (a) en el edificio original; (b) elemento alternativo propuesto.	75
Figura 2.4. IEE y IECO ₂ de los forjados estructurales en función del m ² de superficie útil del edificio.....	75
Figura 2.5. Energía cautiva y estructura de una muestra de 21 casos de estudio extraídos de la literatura.	78

Figura 2.6. Valores de IEE y de IECO ₂ por m ² de superficie útil para diferentes marcos de ventana.....	80
Figura 2.7. Valores de IEE e IECO ₂ por m ² de superficie útil para 5 tipos de pavimentos.....	81
Figura 2.8. Sección de la fachada original del edificio y de la fachada ventilada propuesta.....	82
Figura 2.9. Valor de IEE y de IECO ₂ por m ² de superficie útil, de la fachada original y la alternativa.	83
Figura 2.10. Valor de IEE y de IECO ₂ por m ² de superficie útil de las cubiertas.....	84
Figura 2.11. Variación de la IEE, las IECO ₂ y el presupuesto con respecto al edificio original.....	87
Figura 3.1. Planos de planta del caso de estudio inicial.	90
Figura 3.2. Planos de planta de la vivienda entre medianeras.	100
Figura 3.3. Planos de planta de la vivienda en bloque (dúplex).	101
Figura 3.4. Imágenes del caso de estudio inicial en la representación 3D de la Herramienta Unificada LIDER-CALENER.....	105
Figura 3.5. Imágenes de la vivienda entre medianeras en la representación 3D de la Herramienta Unificada LIDER.....	105
Figura 3.6. Imágenes de la vivienda en bloque (dúplex) en la representación 3D de la Herramienta Unificada LIDER-CALENER.....	107
Figura 3.7. Demanda de calefacción anual para las tres tipologías de vivienda.	111
Figura 3.8. Demanda de refrigeración anual para las tres tipologías de vivienda.	111
Figura 3.9. Demanda de calefacción anual para las tres tipologías de vivienda considerando rotura del puente térmico en frentes de forjado.....	112
Figura 3.10. Demanda de refrigeración anual para las tres tipologías de vivienda considerando rotura del puente térmico en frentes de forjado.....	112
Figura 3.11. Variaciones en la demanda anual de calefacción en los subescenarios de la vivienda aislada con respecto al caso base ₁	114
Figura 3.12. Variaciones en la demanda anual de refrigeración en los subescenarios de la vivienda aislada con respecto al caso base ₁	114
Figura 3.13. Variaciones en la demanda anual de calefacción en los subescenarios de la vivienda entre medianeras con respecto al caso base ₂	115
Figura 3.14. Variaciones en la demanda anual de refrigeración en los subescenarios de la vivienda entre medianeras con respecto al caso base ₂	115
Figura 3.15. Variaciones en la demanda anual de calefacción en los subescenarios de la vivienda entre medianeras con respecto al caso base ₃	116
Figura 3.16. Variaciones en la demanda anual de refrigeración en los subescenarios de la vivienda entre medianeras con respecto al caso base ₃	116
Figura 3.17. Variación de la IEE y del consumo de energía primaria para calefacción y refrigeración considerando el Sistema A en todos los subescenarios de la vivienda aislada para un tiempo de vida de 50 años.	125

Figura 3.18. Variación de la IEE y del consumo de energía primaria para calefacción y refrigeración considerando el Sistema B en todos los subescenarios de la vivienda aislada para un tiempo de vida de 50 años.	125
Figura 3.19. Variación de la IEE y del consumo de energía primaria para calefacción y refrigeración considerando el Sistema C en todos los subescenarios de la vivienda aislada para un tiempo de vida de 50 años.	126
Figura 3.20. Variación de la IEE y del consumo de energía primaria para calefacción y refrigeración considerando el Sistema A en todos los subescenarios de la vivienda entre medianeras para un tiempo de vida de 50 años.	127
Figura 3.21. Variación de la IEE y del consumo de energía primaria para calefacción y refrigeración considerando el Sistema B en todos los subescenarios de la vivienda entre medianeras para un tiempo de vida de 50 años.	127
Figura 3.22. Variación de la IEE y del consumo de energía primaria para calefacción y refrigeración considerando el Sistema C en todos los subescenarios de la vivienda entre medianeras para un tiempo de vida de 50 años.	128
Figura 3.23. Variación de la IEE y del consumo de energía primaria para calefacción y refrigeración considerando los Sistema A, B y C en todos los subescenarios de la vivienda en bloque con pilares no aislados para un tiempo de vida de 50 años.....	129
Figura 3.24. Variación de la IEE y del consumo energético considerando los Sistemas A, B y C en todos los subescenarios de la vivienda en bloque con pilares aislados para un tiempo de vida de 50 años.	130
Figura 4.1. Demanda de calefacción anual obtenida con la HU haciendo uso del valor de catálogo o del valor calculado para la transmitancia térmica lineal ψ (W/mK).	147
Figura 4.2. Demanda de refrigeración anual obtenida con la HU haciendo uso del valor de catálogo o del valor calculado para la transmitancia térmica lineal ψ (W/mK).	148
Figura 4.3. Demanda de calefacción anual obtenida con la HU haciendo uso del valor de catálogo o del valor calculado para la transmitancia térmica lineal ψ (W/mK) , en el caso de considerar el aislamiento de los frentes de forjado.....	148
Figura 4.4. Demanda de refrigeración anual obtenida con la HU haciendo uso del valor de catálogo o del valor calculado para la transmitancia térmica lineal ψ (W/mK), en el caso de considerar el aislamiento de los frentes de forjado.....	149

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1-1. Producción eléctrica neta.....	46
Ecuación 1-2. Consumo final de energía eléctrica.	47
Ecuación 1-3. Factor de conversión de energía final a energía primaria.	48
Ecuación 1-4. Consumos de generación en producción eléctrica.	59
Ecuación 3-1. Transmitancia térmica de los huecos.....	93
Ecuación 4-1. Flujo de calor a través de la envolvente térmica.	132
Ecuación 4-2. Transmitancia térmica lineal.	132

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Consumos energéticos de los hoteles 1 y 2.	40
Tabla 1.2. Caracterización de una muestra de 31 hoteles de playa situados en las Islas Baleares [89].	40
Tabla 1.3. Media, mediana y desviación estándar del consumo energético de una muestra de 31 hoteles situados en las Islas Baleares.	41
Tabla 1.4. Factores de conversión a emisiones de CO ₂	44
Tabla 1.5. Coeficiente de pérdidas en transporte y distribución de energía eléctrica en Baleares.	47
Tabla 1.6. Cálculo del factor de emisión de CO ₂ para la generación eléctrica en Baleares en el año 1995.	50
Tabla 1.7. Cálculo del factor de emisión de CO ₂ para la generación eléctrica en Baleares en el año 1996.	50
Tabla 1.8. Cálculo del factor de emisión de CO ₂ para la generación eléctrica en Baleares en el año 1997.	51
Tabla 1.9. Cálculo del factor de emisión de CO ₂ para la generación eléctrica en Baleares en el año 1998.	52
Tabla 1.10. Cálculo del factor de emisión de CO ₂ para la generación eléctrica en Baleares en el año 1999.	52
Tabla 1.11. Cálculo del factor de emisión de CO ₂ para la generación eléctrica en Baleares en el año 2000.	53
Tabla 1.12. Cálculo del factor de emisión de CO ₂ para la generación eléctrica en Baleares en el año 2001.	54
Tabla 1.13. Cálculo del factor de emisión de CO ₂ para la generación eléctrica en Baleares en el año 2002.	54
Tabla 1.14. Cálculo del factor de emisión de CO ₂ para la generación eléctrica en Baleares en el año 2003.	55
Tabla 1.15. Cálculo del factor de emisión de CO ₂ para la generación eléctrica en Baleares en el año 2004.	56
Tabla 1.16. Coeficiente de pérdidas en transporte y distribución de energía eléctrica en Baleares para los años 2012 y 2013.	59
Tabla 1.17. Rendimientos por tipo de central eléctrica.	59
Tabla 1.18. Coeficientes de paso de consumo de energía primaria a producción eléctrica bruta calculados para el subperiodo 1995-2004.	60
Tabla 1.19. Cálculo del factor de emisión de CO ₂ para la generación eléctrica en Baleares en el año 2012.	62

Tabla 1.20. Cálculo del factor de emisión de CO ₂ para la generación eléctrica en Baleares en el año 2013.....	63
Tabla 1.21. Valores para el factor de emisión de CO ₂ del sistema eléctrico peninsular en el periodo 2005-2030.....	64
Tabla 1.22. Factor de emisión de CO ₂ estimados para el consumo eléctrico en Baleares en el subperiodo 2012-2030.	65
Tabla 1.23. Cuota de participación en la cobertura de la demanda en Baleares. Valores estimados a partir del año 2015.	65
Tabla 1.24. Masa de los materiales y emisiones de CO ₂ asociadas a las reformas básicas analizadas en función del m ² reformado.	67
Tabla 1.25. Emisiones de CO ₂ obtenidas para las cuatro fases del ciclo de vida de los hoteles 1 y 2.....	68
Tabla 2.1. Revisión de la literatura: energía cautiva y tipo de estructura para diferentes edificios y localizaciones.....	76
Tabla 2.2. Transmitancia térmica de los marcos y las ventanas, y comparación con los valores asociados a las ventanas del edificio original.	81
Tabla 2.3. Valores de IEE del edificio junto con sus variaciones, así como las variaciones en los valores de IECO ₂ y en el presupuesto aplicando las modificaciones propuestas en el edificio.	85
Tabla 2.4. Escenarios de mejora propuestos junto con las variaciones de la IEE y las IECO ₂	86
Tabla 3.1. Composición de la fachada F ₀ en el caso de estudio inicial.....	90
Tabla 3.2. Composición del suelo en contacto con el terreno en el caso de estudio inicial.	91
Tabla 3.3. Composición del cerramiento inclinado de cubierta en el caso de estudio inicial.	92
Tabla 3.4. Composición del forjado interior en contacto con espacio no habitable.....	92
Tabla 3.5. Composición del tabique interior en el caso de estudio inicial.	93
Tabla 3.6. Composición del forjado interior entre plantas en el caso de estudio inicial.	93
Tabla 3.7. Composición de las ventanas en el caso de estudio inicial.	94
Tabla 3.8. Composición de la fachada F ₁	95
Tabla 3.9. Composición de la fachada F ₂	95
Tabla 3.10. Composición de la fachada F ₃	95
Tabla 3.11. Composición de la fachada F ₄	96
Tabla 3.12. Composición de la fachada F _{0LC}	96
Tabla 3.13. Composición de la fachada F _{1LC}	97
Tabla 3.14. Composición de la fachada F _{2LC}	97
Tabla 3.15. Composición de la fachada F _{3LC}	98
Tabla 3.16. Composición de la fachada F _{4LC}	98
Tabla 3.17. Composición de la cubierta plana transitable convencional C ₁	98
Tabla 3.18. Composición de la cubierta plana transitable invertida C ₂	99
Tabla 3.19. Composición de las ventanas V ₁ y V ₂	99

Tabla 3.20. Composición de las medianeras en el caso de la vivienda entre medianeras y el dúplex.	101
Tabla 3.21. Composición de los balcones y las pasarelas de acceso en el caso del dúplex.	102
Tabla 3.22. Propuesta de escenarios y subescenarios para el análisis.	102
Tabla 3.23. Sistemas de climatización considerados para estimación del consumo energético.....	108
Tabla 3.24. Valores climatológicos normales para las Islas Baleares en el periodo 1981-2010.	109
Tabla 3.25. Grados día de calefacción y refrigeración en diferentes ciudades de clima mediterráneo, para el periodo 2010-2014.....	109
Tabla 3.26. Valor de IEE de la fachada F_0 y de cada uno de sus componentes.	117
Tabla 3.27. Valor de IEE de la fachada F_1 y de cada uno de sus componentes.	118
Tabla 3.28. Valor de IEE de la fachada F_2 y de cada uno de sus componentes.	118
Tabla 3.29. Valor de IEE de la fachada F_3 y de cada uno de sus componentes.	118
Tabla 3.30. Valor de IEE de la fachada F_4 y de cada uno de sus componentes.....	118
Tabla 3.31. Valor de IEE de la fachada F_{0LC} y de cada uno de sus componentes.....	119
Tabla 3.32. Valor de IEE de la fachada F_{1LC} y de cada uno de sus componentes.....	119
Tabla 3.33. Valor de IEE de la fachada F_{2LC} y de cada uno de sus componentes.....	119
Tabla 3.34. Valor de IEE de la fachada F_{3LC} y de cada uno de sus componentes.....	119
Tabla 3.35. Valor de IEE de la fachada F_{4LC} y de cada uno de sus componentes.....	119
Tabla 3.36. Valor de IEE de las medianeras y de cada uno de sus componentes.	120
Tabla 3.37. Valor de IEE de la cubierta inclinada C_0 y de cada uno de sus componentes.	120
Tabla 3.38. Valor de IEE de la cubierta plana convencional C_1 y de cada uno de sus componentes.	120
Tabla 3.39. Valor de IEE de la cubierta plana invertida C_2 y de cada uno de sus componentes.	121
Tabla 3.40. Valor de IEE de los forjados interiores y de cada uno de sus componentes.	121
Tabla 3.41. Valor de IEE de los suelos en contacto con el terreno y de cada uno de sus componentes.	121
Tabla 3.42. Intervalo de variación del consumo de energía primaria por m ² de superficie útil al considerar la rotura del puente térmico en frentes de forjado.	123
Tabla 4.1. Resultados hallados para cada uno de los encuentros de frente de forjado con fachada evaluados.....	135
Tabla 4.2. Resultados hallados para cada uno de los encuentros de frente de forjado con fachada evaluados considerando una solución típica de aislamiento del frente de forjado.	141
Tabla 4.3. Resumen de los valores de transmitancia térmica lineal calculados juntamente con los valores de catálogo asociados en la HU para cada caso concreto .	145
Tabla 4.4. Resumen de los valores de transmitancia térmica lineal calculados juntamente con los valores de catálogo asociados en la HU para cada caso concreto.	145

Tabla 4.5. Temperatura superficial interior mínima y factor de temperatura superficial interior para los encuentros de frentes de forjado con fachadas analizados..... 146

Tabla 4.6. Temperatura superficial interior mínima y factor de temperatura superficial interior para los encuentros de frentes de forjado con fachadas analizados..... 146

Anexos

Anexo II

Tabla II. 1. Factores de conversión de energía final a energía primaria y a emisiones de CO₂ para el consumo eléctrico en Baleares. Periodo 2012-2030..... 169

Tabla II. 2. Estimación de las emisiones de CO₂ en el hotel 1..... 170

Tabla II. 3. Estimación de las emisiones de CO₂ en el hotel 2..... 172

Anexo III

Tabla III. 1. Valores de demanda energética obtenidos para la vivienda aislada, entre medianeras y en bloque evaluadas con la Herramienta Unificada LIDER-CALENER.
..... 174

Parte I . Introducción, objetivos y metodología.

Introducción

La concentración de emisiones de CO₂ se ha incrementado desde 280 partes por millón (ppm) en épocas preindustriales [1] hasta el valor de 400.43 ppm, registrado en noviembre de 2015 en el Observatorio de Mauna Loa en Hawái [2]. El cambio climático es, principalmente, una consecuencia del aumento de gases de efecto invernadero (GEI) causadas por las actividades humanas [1]. El Sector de la Edificación contribuye de manera significativa a la emisión de los GEI, de los cuales el más importante es el dióxido de carbono (CO₂) [3]. En los últimos años, la preocupación por el medio ambiente ha provocado que cada vez sean más los autores que analizan los impactos medioambientales relacionados con la construcción y utilización de los edificios.

Los edificios de la Unión Europea contribuyen al 40% del consumo de energía y emisiones de CO₂, al 30% del consumo de materias primas y al 20% del consumo de agua [4]. En España, el consumo energético del Sector de la Edificación representó el 17% del consumo de energía final en el año 2005 [5] y cerca del 23% en el año 2010 [6]. El número de edificios era, en el año 2011, de cerca de 10 millones y el número de viviendas superaba los 25 millones [7]. Se estima que la producción de los materiales de construcción utilizados antes de la crisis económica, en el año 2006, supuso la emisión de 60 millones de toneladas de CO₂ [8]. En ese mismo año, las emisiones de CO₂ asociadas al consumo de energía de los edificios se estima próximo a los 90 millones de toneladas [9].

Desde el año 1972, en que se presentó la primera Declaración de Principios sobre el Medio Ambiente como resultado de la Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Humano (Conferencia de Estocolmo) [10], se han desarrollado un gran número de estudios y proyectos con el objetivo de analizar y resolver los problemas causados por la acción humana sobre el medio ambiente. El desarrollo sostenible definido en el “Informe Brundtland” [11] como aquel que “*satisface las necesidades actuales de las personas sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas*” resume claramente este objetivo. El camino hacia la consecución de las metas de reducción de las emisiones de GEI, observado tras la adopción del Protocolo de Kioto [12] de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en el año 1997, ha derivado en la aprobación por parte de diversos países de planes y estrategias encaminados a detener el calentamiento global. La Unión Europea (UE) estableció para el año 2020 los conocidos como “objetivos 20-20-20” [13], incluidos en la estrategia Europa 2020, según los cuales los Estados miembros de la Unión deberían, en su conjunto, reducir las emisiones de GEI en un 20%, respecto a los niveles de 1990, aumentar la participación de las energías renovables en el consumo energético hasta el 20%, y reducir en un 20% el consumo de energía primaria, respecto a los niveles proyectados, mediante un incremento de la eficiencia energética. El objetivo de reducción de emisiones de GEI, que podría verse incrementado hasta el 30% si se consiguen acuerdos internacionales [13], se ha visto complementado con la publicación en marzo de 2013 por la Comisión Europea de una hoja de ruta para conseguir reducciones de entre el 80 y el 95% para el año 2050 [14]. En el año 2002 se

aprobó la Directiva 2002/91/CE [15] del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la eficiencia energética de los edificios. Esta Directiva presentaba como objetivo final fomentar la eficiencia energética de los edificios de la UE, y establecía la aplicación por parte de los Estados miembros de requisitos mínimos de eficiencia energética, la creación de una metodología para la certificación energética y la inspección periódica de determinados sistemas energéticos. Su transposición al marco legal español resultó, entre otros, en la aprobación del Real Decreto 314/2006 [16], por el cual se aprobó el Código Técnico de la Edificación (CTE), y del Real Decreto 47/2007 [17] para la aprobación del Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción. En el año 2010 se aprobó la Directiva 2010/31/UE [18], a través de la cual se llevaron a cabo modificaciones sustantivas con respecto a la Directiva de eficiencia energética anterior. Una de las grandes novedades establecidas en esta Directiva, fue la introducción del concepto de Edificios de Consumo de Energía Casi Nulo (ECECN), como *“aquellos con un nivel de eficiencia energética muy alto (determinado conforme al anexo I de la Directiva), y en los cuales la cantidad casi nula o muy baja de energía requerida debería estar cubierta, en muy amplia medida, por energía procedente de fuentes renovables, incluida la producida in situ o en el entorno”*. Respecto a este nuevo concepto de edificios, la Directiva establece que “los Estados miembros se asegurarán de que:

- a más tardar el 31 de diciembre de 2020, todos los edificios nuevos sean ECECN, y de que
- después del 31 de diciembre de 2018, los edificios nuevos que estén ocupados y sean propiedad de autoridades públicas sean edificios de consumo de energía casi nulo ECECN” [18].

Además, se establece que los Estados miembros deberán elaborar planes nacionales con el objetivo de incrementar este tipo de edificios, y que se formularán políticas para la transformación de edificios existentes en ECECN [18]. En junio de 2013, la Comisión Europea presentó un primer informe sobre los avances de los Estados miembros en el proceso de implementación de los ECECN [19]. En este informe se observó que, en el momento de su preparación, solamente Bélgica, Chipre, Dinamarca, Irlanda y Lituania presentaban una definición completa de los ECECN, con un objetivo numérico para el consumo de energía primaria y un porcentaje de energía procedente de fuentes renovables [19]. Entre los demás Estados miembros se observó que la preparación de las definiciones, la instauración de medidas de apoyo económicas y la fijación de objetivos intermedios se encontraban en diferentes niveles de desarrollo [19]. Los edificios presentan uno de los mayores potenciales de ahorro energético rentable económicamente, después del sector energético [20], pero la falta de un marco reglamentario específico, una definición clara y la instauración de medidas de apoyo económicas, hace que el sector de la construcción se enfrente con un periodo de incertidumbre en lo que respecta a la instauración de los ECECN [19]. El consumo controlado de energía en los países europeos, así como una mayor contribución de fuentes de energía renovables, unidos al incremento de la eficiencia energética, son medidas necesarias para obtener la reducción deseada de emisiones de GEI y poder cumplir así con los compromisos del Protocolo de Kioto [21]. La transposición en

España de las nuevas exigencias de la Directiva 2010/31/UE se llevó a cabo a través de la aprobación en el año 2013 del Real Decreto 235/2013 [22] por el cual se aprobó el procedimiento básico para la certificación energética de edificios existentes.

Las normativas y planes establecidos en la edificación se centran en la reducción de los consumos energéticos y las emisiones de CO₂ derivados del tiempo de utilización de los edificios. La energía cautiva o embebida (“*embodied energy*”, en inglés) referida a la energía consumida en la extracción de materias primas, procesos de fabricación y transportes intermedios de los materiales de construcción, así como sus emisiones asociadas, son, sin embargo, un tema olvidado en los planes nacionales de lucha contra el cambio climático. Han sido muchos los autores que han enfatizado este hecho en sus estudios y publicaciones. García-Casals [23], por ejemplo, resalta el hecho de que los análisis de la energía cautiva no hayan sido incluidos en la certificación energética de los edificios, y subraya este tipo de análisis como cruciales en el camino hacia la obtención de edificios sostenibles. Este autor ha demostrado que una vivienda eficiente puede presentar un consumo energético superior al de una vivienda convencional a lo largo de su ciclo de vida, si los materiales utilizados en su construcción no se seleccionan teniendo en cuenta el valor de su energía cautiva. Zabalza et al. [24] han discutido acerca de las contradicciones de que edificios con una mejor clasificación energética puedan presentar mayores consumos energéticos totales al llevar a cabo un Análisis del Ciclo de Vida (ACV), definido por la *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) como un proceso para evaluar los impactos medioambientales asociados a un producto o proceso mediante la identificación y cuantificación de la energía consumida, los recursos materiales utilizados y los residuos producidos, con el fin de evaluar las oportunidades de mejora en relación con el medio ambiente [25]. En la misma línea, Gustavsson y Joelsson [26] llevan a cabo una comparación entre edificios residenciales convencionales con edificios de bajo consumo, y demuestran que la reducción del consumo energético durante la fase de uso de los edificios resulta en un incremento de su energía cautiva derivada de los materiales utilizados en su construcción. Blengini y DiCarlo [27] analizan una vivienda unifamiliar situada en Italia considerada como “sostenible” por su alta eficiencia energética. Estos autores observan, sin embargo, que la energía cautiva derivada de los materiales utilizados en su construcción presenta una contribución elevada a la energía consumida a lo largo de su ciclo de vida. En el camino hacia edificios de consumo de energía casi nulo, el análisis de la energía cautiva es generalmente ignorado, porque toda la atención está centrada en reducir los consumos energéticos en su fase de uso [28]. Tal como declararon Stephan et al. [29], los límites del sistema establecidos en la certificación energética europea no siempre dan como resultado una reducción del consumo energético global de los edificios.

Estado del Arte

El sector de la edificación presenta el mayor potencial de reducción de los GEI de todos los sectores [30]. La eficiencia energética es un tema de vanguardia en los discursos políticos, debido a los elevados precios energéticos y al cambio climático [31]. Los estudios concuerdan en que los consumos energéticos más elevados a lo largo del ciclo de vida de los edificios se producen en la fase de funcionamiento de los mismos y que la

propuesta de medidas de ahorro energético y la aplicación de sistemas más eficientes, así como la mayor utilización de energías renovables se hace cada vez más necesario a día de hoy [32]–[35]. Los estudios que analizan la fase de funcionamiento de los edificios son más habituales en los trabajos de investigación que los que analizan otras fases del ciclo de vida de un edificio. Florides et al. [36], por ejemplo, evalúan medidas para reducir la carga térmica en viviendas modernas haciendo uso de la herramienta informática TRNSYS. Las medidas evaluadas en el estudio son: ventilación natural y forzada, protección solar, diferentes tipos de vidrios, orientación y tipos de edificación. Los autores observan, entre otras cosas, que la ventilación forzada nocturna permite una reducción de la carga de refrigeración en verano, que las ganancias térmicas de los huecos de la edificación son relevantes, que la sustitución de los vidrios permite grandes ahorros energéticos, que la forma del edificio afecta a la carga térmica y que los edificios alargados muestran incrementos en la demanda de calefacción. Dascalaki y Balaras [37] presentan una metodología y un software denominado XENIOS, para la realización de auditorías preliminares en edificios hoteleros y la obtención de las medidas más eficientes de reducción del consumo energético. Las medidas analizadas en el estudio son entre otras: la aplicación de energías renovables (energía solar para calentamiento de agua de piscinas y enfriamiento solar), medidas de control de la luz solar y sustitución de luminarias. Teniendo en cuenta que los hoteles se hallan entre los edificios del sector terciario con mayores valores de consumo energético, se observa que los estudios llevados a cabo en la fase de funcionamiento de este tipo de edificios son abundantes [38]–[42]. En cuanto a edificios de oficinas también se han realizado estudios para reducir sus consumos energéticos en la fase de funcionamiento. Como ejemplo de ello, un trabajo de Bodart y De Herde [43], en el que se analizan los ahorros energéticos que se pueden alcanzar en edificios de oficinas mediante un mayor aprovechamiento de la iluminación natural. En este estudio se utilizan dos herramientas informáticas de simulación: ADELIN, para la simulación de la luz natural, y TRNSYS que permite la simulación del comportamiento térmico del edificio. Los autores analizan la variación del consumo de iluminación artificial mediante la modificación de una serie de factores, como la posición y orientación de las ventanas y el factor de transmisión de los vidrios entre otros, y concluyen que el potencial de ahorro de energía primaria puede ser del 50% en función de la calidad de los vidrios utilizados.

El análisis de los impactos medioambientales del sector de la edificación es un campo de investigación en expansión. Numerosos estudios han venido demostrando desde la década de los setenta que la energía consumida y las emisiones, relacionados con los materiales utilizados en la construcción de los edificios, pueden llegar a suponer una parte significativa del balance a lo largo de su ciclo de vida. Ya en 1975, Haseltine [44] llevó a cabo un estudio en el que analizaba la energía utilizada en la producción de ciertos elementos edificatorios, y destacaba la elevada energía embebida de los marcos de aluminio frente a los marcos de madera para las ventanas. Baird y Chan [45], en 1983, analizaron la energía cautiva de los materiales utilizados en la construcción de una vivienda. En este estudio los autores hallaron que había elementos, como las cubiertas de hierro galvanizado, que presentaban elevados valores de energía cautiva en comparación con otros elementos. Buchanan [46] llevó a cabo, en 1991, la comparación de diferentes materiales utilizados en la construcción y concluía que la sustitución de una tonelada de acero por madera evitaba la emisión de una tonelada de carbono a la atmósfera. Poco después, Honey y Buchanan (1992) [47] estimaron que un incremento

de la construcción de madera en Nueva Zelanda podía evitar la emisión de 100.000 toneladas de carbono. Cole y Rousseau (1992) [48], a su vez, llevaron a cabo una comparación entre cuatro tipologías de cerramientos de características similares y observaron que los compuestos con una mayor cantidad de acero y aluminio presentaban los mayores valores de energía cautiva y emisiones de CO₂. Debnath et al. [49] llevaron a cabo un análisis comparativo de la energía cautiva de los principales materiales constructivos utilizados en tres tipos de viviendas y destacaron, ya en el año 1995, que cualquier medida de reducción del consumo de energía en los edificios debía incluir los derivados de los materiales utilizados en su construcción. En los estudios realizados desde una perspectiva de ciclo de vida se observa que la fase de construcción juega un papel también importante en el cómputo de los consumos energéticos y las emisiones. Esto es así, en mayor o menor medida, en función de la diferente elección de los materiales en la etapa de diseño de los edificios. Por tanto, sólo la optimización del comportamiento del edificio durante la fase de utilización sumada a una elección inteligente de los materiales de construcción, puede hacer que se reduzcan los impactos medioambientales de los edificios [32].

En los estudios que analizan los edificios a lo largo de su ciclo de vida se observa que son variadas las metodologías y herramientas utilizadas. Los resultados obtenidos en los mismos dependen de factores tales como la zona climática donde se encuentre ubicado el edificio, las bases de datos utilizadas, el tiempo de vida seleccionado y los límites establecidos en el sistema, entre otros. Aspectos a tener en cuenta a la hora de llevar a cabo comparaciones. Adalberth [50, 51] por ejemplo, propone un método para calcular el consumo energético a lo largo del ciclo de vida de edificios situados en Suecia. Los datos que utiliza son obtenidos de publicaciones realizadas por institutos de investigación del país. Los resultados de este estudio muestran que, en el caso de las viviendas analizadas, el 85% del consumo energético corresponde a la fase de funcionamiento, el 15% al consumo energético derivado de la fabricación de los materiales de construcción y que el consumo energético derivado de la construcción y la demolición del edificio únicamente supone el 1% del consumo energético total. Todo ello para un tiempo de vida de 50 años. Cole y Kernan [32] analizan la energía cautiva y el consumo energético en un edificio de oficinas de tres plantas. Los tiempos de vida considerados en el estudio son de 25, 50 y 100 años y el análisis se lleva a cabo para tres tipos de sistemas estructurales diferentes. El consumo energético en la fase de funcionamiento se analiza haciendo uso de la herramienta informática DOE-2 y los valores de energía cautiva se obtienen de la herramienta de simulación ATHENATM. En cuanto a los valores de consumo energético en la fase de demolición, estos son obtenidos de la literatura. En este estudio, los autores observan que la estructura del edificio es el componente que presenta una mayor contribución a la energía cautiva inicial de un edificio, y que la fase de funcionamiento es la que presenta los mayores valores de consumo energético. Baird et al. [52], destacan la necesidad de determinar la cantidad de energía utilizada en la fabricación de los materiales de construcción y evalúan, además, las variaciones en los coeficientes de energía cautiva asociados a diferentes materiales debido al aumento de la eficiencia energética en los procesos de fabricación. Harris [53], nuevamente, hace hincapié en la importante contribución que los materiales tienen en el impacto ambiental global de un edificio y desarrolla una herramienta para evaluar y comparar diferentes diseños. Por su parte, Venkatarama

Reddy y Jagadish [54], en la comparación de un edificio de dos plantas convencional con otro similar construido con materiales alternativos obtienen una reducción del 55% en los valores de energía cautiva asociados al edificio. González y Navarro [55] demuestran que una selección de materiales de bajo impacto ambiental en la fase de construcción de tres casas adosadas en España puede reducir las emisiones de CO₂ en un 27,28%. Mithraratne y Vale [56] presentan un modelo desarrollado en la Universidad de Auckland para analizar el impacto medioambiental de viviendas situadas en Nueva Zelanda a lo largo de su ciclo de vida. El modelo se basa en datos de energía cautiva para materiales de construcción de la región y el método propuesto es utilizado para comparar diferentes tipos de construcciones típicas en una vivienda estándar. Los valores de energía para la fase de utilización se obtienen de una simulación llevada a cabo con la herramienta ALF, que permite hallar los valores de demanda energética. En este estudio se analiza la variación de la demanda teniendo en cuenta tres tipos de cerramientos diferentes. Estos autores demuestran que el impacto medioambiental de un edificio sigue el mismo patrón que el consumo energético a lo largo de su ciclo de vida. Scheuer et al. [35] realizan un ACV completo de un edificio de la Universidad de Michigan. En este estudio se analizan un total de seis indicadores de impacto: consumo de energía primaria, potencial de calentamiento global, potencial de agotamiento del ozono, potencial de eutrofización, potencial de acidificación y generación de residuos. A partir de los resultados obtenidos, se observa que la fase de utilización del edificio supone el 97,7% del consumo energético total para un tiempo de vida de 75 años, mientras que el consumo energético derivado de la demolición del edificio presenta una participación de sólo el 0,2%. Tal como indican los autores en este estudio, se debe poner énfasis en la optimización del comportamiento del edificio durante la fase de funcionamiento con el fin de mejorar su relación con el medio ambiente. También destacan el hecho de que algunos materiales presentan elevados valores de energía cautiva.

La necesidad de tener en cuenta los valores de energía cautiva en la etapa de diseño de los edificios es destacado también por otros autores, como Thormark [57], que analiza la reducción de los impactos medioambientales de una vivienda construida con una gran proporción de materiales reciclados. Los resultados obtenidos, mediante la realización de un ACV, muestran que los impactos se reducen en un 45% respecto a la misma vivienda construida con materiales nuevos. Una herramienta informática desarrollada por el Instituto Danés de Investigación en la Edificación (*LCA Database and Inventory Tool*, versión 2.38) es utilizada en los cálculos. El uso de productos reciclados en la construcción es una necesidad para mejorar la gestión ambiental [58]. La misma autora, Thormark, en otro estudio publicado en el año 2002 [59], analiza de nuevo la energía cautiva a lo largo del ciclo de vida, comparándola esta vez con la energía consumida durante la fase de utilización de una vivienda eficiente construida en Suecia. El tiempo de vida considerado es de 50 años y los datos de energía cautiva de los materiales de construcción son extraídos de la literatura. El estudio muestra que la energía cautiva de los materiales de construcción supone el 40% del consumo energético total y que entre el 37% y el 42% de su energía cautiva puede ser recuperada a través del reciclaje. Arena y De Rosa [60] concluyen que la elección de materiales menos intensivos energéticamente puede ser tan eficaz como el uso de energía solar o la mejora del aislamiento térmico de un edificio. Webster [61] analiza diferentes tipos de construcciones en Estados Unidos y Montreal desde una perspectiva de ciclo de vida, considerando tiempos de vida de 25, 50 y 100 años. Este autor, que se centra

fundamentalmente en el consumo energético derivado de los materiales de construcción y de la fase de operación de un edificio, destaca el hecho de que el sistema estructural de los edificios puede llegar a suponer más del 10% del consumo energético total y de las emisiones de efecto invernadero para un tiempo de vida de 50 años. Destaca, por tanto, el hecho de que una selección inteligente de los materiales que componen la estructura de los edificios puede conllevar a una reducción de las emisiones, de la utilización de recursos y de los residuos generados. *“Es necesaria una mejora medioambiental del sector de la edificación, con una contaminación en aumento, si se quiere conseguir una sociedad sostenible”*. Con estas palabras inician Allacker y De Troyer [62] un análisis de los impactos medioambientales de los edificios, en el que presentan una metodología para solventar las dificultades halladas al llevar a cabo un ACV siguiendo las normas ISO 14040, relativas al ACV [63]. En este estudio los autores muestran la aplicación de la metodología propuesta en la comparación de diferentes tipologías de fachadas en Bélgica. Los cambios de la energía cautiva mediante la utilización de diferentes materiales de construcción han sido evaluados en numerosos estudios. Buchanan y Honey [64], por ejemplo, comparan la variación de la energía cautiva al sustituir materiales como el hormigón y el acero por madera en diferentes tipologías de edificios situados en Nueva Zelanda. Ramesh et al. [65] evalúan la energía cautiva y la energía operacional de una vivienda utilizando diferentes fachadas y considerando cinco zonas climáticas de la India. Hacker et al. [66], por su parte, evalúan las emisiones de CO₂ cautivas y las derivadas de la fase de uso de una vivienda semiadossada situada en Inglaterra utilizando cuatro tipos diferentes de construcción.

El efecto que el tamaño del edificio y su tipología pueden tener sobre los valores de energía cautiva, es analizado y discutido también por diversos autores. Stephan et al. [67], por ejemplo, evalúan una serie de escenarios y observan una reducción del consumo energético por cápita del 19,6%, al sustituir una parte de las viviendas aisladas de un vecindario de Melbourne por edificios de apartamentos. El interés por la mejora del comportamiento medioambiental de los edificios se refleja de manera clara en los estudios. Sin embargo, existen brechas entre los métodos utilizados [66, 67] y dificultades a la hora de aplicar los estándares de ACV [70]–[72]. Tal como discuten Crawford et al. [73] hay escasez de datos disponibles para los profesionales de la construcción a la hora de mejorar el comportamiento medioambiental en sus proyectos. En esta línea, Stephan et al. [74] desarrollan una herramienta informática para llevar a cabo evaluaciones de ciclo de vida en edificios residenciales. J. Kneifel [31] muestra que medidas tales como el incremento del aislamiento térmico, la instalación de vidrios bajo emisivos, y de sistemas de control de la luz natural permiten disminuir el consumo energético en nuevos edificios comerciales en un 20-30%. Este autor realiza además un análisis de los costes, para demostrar que el sobrecoste inicial de la aplicación de estas medidas viene compensado por los ahorros energéticos durante el tiempo de servicio del edificio. Este autor estudia doce tipologías de edificios situados en 16 ciudades diferentes, y, además, tres diseños de edificación diferentes para cada región. La herramienta informática utilizada en el análisis, BEES, permite analizar el ciclo de vida de la energía, el flujo de materiales y los costes. F. Nemry et al. [75] presentan un estudio realizado en colaboración entre España y Alemania en el que muestran opciones para reducir los impactos medioambientales de edificios residenciales de la Unión Europea. En este estudio, se utiliza el software GaBi 4 para llevar a cabo el ACV y el software epiqr® para el análisis de costes. En una fase previa, los autores realizan una

caracterización de los edificios típicos de los países de la UE, para a continuación llevar a cabo el análisis de una serie de categorías de impacto, centrándose fundamentalmente en el potencial de calentamiento global. En este estudio se presentan propuestas de mejora orientadas a edificios existentes y se observa que llevando a cabo una mejora de la calidad de los vidrios, aumentando los aislamientos en fachadas y cubiertas, y reduciendo las infiltraciones se obtiene un potencial de reducción de los impactos medioambientales de un 20%. Zhixing Luo et al.[76] evalúan las emisiones de CO₂ cautivas de la fase de construcción de 78 edificios de oficinas situados en China y observan que el acero, el hormigón, el yeso y los ladrillos suponen más del 80% de las emisiones de CO₂ cautivas de la fase de construcción. Brown et al. [77] analizan la importancia de los GEI embebidos en las reformas de edificios llevadas a cabo para mejorar su eficiencia energética. Estos autores obtienen un valor medio situado entre 10 gCO₂ y 20 gCO₂ de GEI embebidos por cada kWh reducido de energía operacional. Koesling et al. [78] analizan la energía cautiva y operacional en construcciones agrícolas situadas en Noruega. En este estudio se observa que la energía cautiva supone entre el 10% y el 30% de la energía consumida en la fase operacional de los edificios analizados. Estos autores presentan un método de cálculo aplicable a otros edificios y concluyen que el diseño de edificios con una menor cantidad de materiales así como la elección de materiales con una menor energía embebida, puede reducir considerablemente la energía cautiva total de los edificios.

Se ha observado que la mayoría de los estudios que analizan los impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida de los edificios se centran en viviendas. El análisis de edificios del sector terciario de grandes dimensiones se centra, fundamentalmente, en medidas de reducción de los consumos energéticos durante su fase de funcionamiento. De hecho, se ha observado que los estudios que analizan la energía cautiva de edificios con una superficie mayor a 10 000 m² son prácticamente inexistentes. La reducción de la energía y las emisiones de CO₂ cautivas asociadas a los materiales de construcción, se evalúan por lo general para un número reducido de alternativas de diseño. Se ha observado, además, que el tratamiento de los puentes térmicos de la edificación, desde el punto de vista de la energía cautiva, no es incluido en los análisis. Estas han sido las razones que han impulsado el estudio que se presenta en este documento, que se centra en edificios situados en las Islas Baleares.

Objetivos

En este estudio se establecen como objetivos fundamentales los siguientes:

- El análisis de las emisiones de CO₂ a lo largo del ciclo de vida de edificios hoteleros.
- El análisis de la energía cautiva y sus emisiones de CO₂ asociadas, en la fase de construcción de un edificio educativo de grandes dimensiones.
- La propuesta de medidas de reducción de la energía cautiva y las emisiones de CO₂ en la fase de construcción de edificios del sector terciario y residencial.
- El análisis de la relación entre la energía cautiva y la demanda energética en viviendas.
- El análisis de los puentes térmicos presentes en la edificación desde el punto de vista de la energía cautiva.

Metodología

En este estudio se han analizado edificios del sector terciario y residencial desde una perspectiva de ciclo de vida. Cada uno de los análisis llevados a cabo se ha centrado en aspectos diferentes dentro del ciclo de vida de los edificios evaluados, tal como se detallará en la sección de Resultados.

De manera general, se han considerado cuatro fases en el ciclo de vida de los edificios:

- Fase de construcción: que abarca desde la extracción de las materias primas hasta la construcción in situ del edificio.
- Fase de utilización: que abarca los años de funcionamiento del edificio.
- Fase de reformas: que incluye los procesos de mantenimiento y renovación de los edificios.
- Fase de demolición: que incluye los procesos llevados a cabo para dismantelar el edificio así como el transporte de los residuos a los centros de tratamiento.

El tiempo de funcionamiento de los edificios se ha considerado de 50 años, para facilitar la comparación de los resultados con los obtenidos en otros estudios. La energía ha sido expresada en el documento en función de kWh, por ser ésta una unidad ampliamente utilizada en el sector de la edificación. Las herramientas utilizadas para llevar a cabo el análisis se describen a continuación:

1) Análisis de la energía cautiva y las emisiones de CO₂ asociadas

El análisis de la energía cautiva y las emisiones de CO₂ asociadas se ha llevado a cabo utilizando la herramienta informática TCQ del Instituto de Tecnología de la Construcción de Catalunya (ITeC) [79]. Concretamente, el módulo de Presupuestos y Condiciones Técnicas, TCQ2000, y el módulo de gestión medioambiental, TCQGMA. Esta herramienta permite, a partir de la introducción de los diferentes elementos del estado de mediciones de un edificio, obtener la cantidad de materiales básicos utilizados, los consumos energéticos, las emisiones de CO₂ y los residuos generados. Los consumos energéticos de la maquinaria son calculados en función de su potencia y corregidos por un factor que depende en cada caso del tipo de motor y del combustible utilizado[79]. La herramienta TCQGMA ofrece a los técnicos la posibilidad de comprobar los impactos medioambientales de sus proyectos. En esta herramienta los diferentes elementos del estado de mediciones del proyecto se descomponen en sus materiales constituyentes, y cada constituyente tiene asociado un factor de consumo energético y de emisiones de CO₂. La base de datos utilizada es el Banco Estructurado de Datos de Elementos Constructivos (BEDEC PR/PCT), que contiene más de 300.000 elementos de edificación, urbanización, ingeniería civil, rehabilitación y restauración,

seguridad y salud, ensayos de control y gastos comerciales de un gran número de empresas y datos medioambientales [80].

2) Análisis de la demanda energética

Para el análisis de la demanda energética se ha utilizado la Herramienta Unificada LIDER-CALENER [81] proporcionada por el Ministerio de Fomento como herramienta para la certificación energética de edificios en España. Como su nombre indica, se trata de la unificación en la misma plataforma de las herramientas LIDER y CALENER, ya utilizadas en España con anterioridad. LIDER es la implementación informática de la opción general ofrecida por el Ministerio de Vivienda y por el IDAE para la verificación de la exigencia de Limitación de demanda energética (DB HE1), establecida en el Documento Básico HE “Ahorro de Energía” [82] del Código Técnico de la Edificación (CTE), aprobado por el Real Decreto 314/2006 de 17 de marzo [16]. El Documento básico DB-HE 1, de Limitación de demanda energética, presenta la exigencia básica según la cual los edificios dispondrán de una envolvente de características tales que limite adecuadamente la demanda energética necesaria para alcanzar el bienestar térmico en función del clima de la localidad y del uso del edificio [82]. La herramienta LIDER [83] permite la representación 3D del edificio y está basada en un algoritmo creado por el Grupo de Termotecnia de la Universidad de Sevilla (AICIA). La geometría del edificio y de todos sus componentes son definidos por el usuario. Aspectos como los datos climáticos, los horarios de utilización o las temperaturas de consigna son determinados por la herramienta en el caso de edificios residenciales. El método utilizado para el análisis del comportamiento térmico del edificio tiene en cuenta las solicitaciones exteriores e interiores de manera simultánea y los efectos de la masa térmica [84]. El método de cálculo es hora a hora y en régimen transitorio [84]. Además, incluye el efecto de las sombras del propio edificio y de otros obstáculos remotos, como edificios vecinos u otros [84]. Respecto a la radiación solar, se incluyen las ganancias y pérdidas por conducción y la radiación absorbida a través de los cerramientos opacos y los semitransparentes, así como la transmisión solar a través de los vidrios y el efecto de las persianas y cortinas exteriores [84]. El cálculo de las infiltraciones se realiza a partir del parámetro de permeabilidad de las ventanas [84]. Incluye, además, el acoplamiento térmico entre zonas adyacentes con un nivel térmico diferente y tiene en cuenta el efecto de las fuentes internas [84]. Esta aplicación informática fue validada mediante BESTEST (Building Energy Simulation Tests) por la Agencia Internacional de la Energía (IEA) [84]. En estos test, la verificación del algoritmo fue llevada a cabo mediante la comparación de los resultados con los obtenidos por una serie de herramientas informáticas, tales como DOE-2 o TRNSYS. Un amplio número de casos fueron evaluados, bajo las condiciones establecidas por la IEA, con el objetivo de identificar errores y obtener la validación [84].

3) Análisis de los puentes térmicos

Para la modelización de los puentes térmicos se ha utilizado la herramienta THERM 7.3. desarrollada por el *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL) y el *Center for Environmental Design Research* de la Universidad de California [85]. Se trata de un programa informático, basado en el método de elementos finitos, para el análisis del flujo de calor bidimensional a través de elementos constructivos tales como ventanas, paredes o cubiertas [86]. Una definición más detallada del procedimiento llevado a cabo para el análisis de los puentes térmicos se presenta en el Capítulo 4 de la sección de Resultados.

Parte II . Resultados, discusión y conclusiones.

Resultados

Los resultados de la Tesis Doctoral han sido presentados en forma de capítulos para facilitar la observación de los análisis llevados a cabo.

Capítulo 1. Análisis de las emisiones de CO₂ durante el ciclo de vida de edificios hoteleros situados en las Islas Baleares.

Objetivos

El objetivo fundamental de este capítulo es obtener el balance global de las emisiones de CO₂ a lo largo del ciclo de vida de edificios hoteleros situados en las Islas Baleares. Para la realización del análisis se han establecido además una serie de objetivos parciales, que se enumeran a continuación:

- Análisis de la composición de materiales y la masa de los edificios analizados.
- Análisis de los consumos energéticos en edificios hoteleros situados en las Islas Baleares.
- Análisis del factor de emisión de CO₂ asociado a la generación de energía eléctrica en Baleares.

Metodología

En este capítulo se han analizado las emisiones de CO₂ a lo largo del ciclo de vida de una serie de edificios hoteleros situados en las Islas Baleares. Dichos edificios han sido definidos en el apartado “Casos de estudio”. Para la realización del estudio se han considerado cuatro fases en el ciclo de vida: fase de construcción, fase operacional, fase de reformas y fase de demolición.

El tiempo de vida considerado en el estudio ha sido de 50 años, ampliamente utilizado por otros autores. A continuación se detalla la metodología y los casos analizados, para cada una de las fases consideradas:

- En el análisis de la fase de construcción se han analizado un total de tres hoteles de cuatro estrellas. Los datos han sido obtenidos de los estados de mediciones y planos de los mismos. Se trata de dos hoteles de playa y uno de ciudad. En lo que respecta a la energía consumida en esta fase del ciclo de vida, hay que distinguir entre la energía cautiva o embebida asociada a los materiales (energía cautiva inicial, “IEE” por sus siglas en inglés) y la energía consumida en los procesos de construcción del edificio. Por analogía, las emisiones de CO₂ asociadas a la energía cautiva inicial reciben el nombre de emisiones de CO₂ cautivas (“IECO₂”) [32]. Para llevar a cabo el análisis de esta fase se ha dividido el proyecto de construcción en siete capítulos, que no se corresponden exactamente con los del estado de mediciones:

- a) Movimiento de tierras y cimentación;
- b) Estructura;
- c) Albañilería, cubierta, revestimientos y pavimentos;
- d) Carpinterías, vidrios, pintura y otros elementos como lucernarios y ascensores;
- e) Instalación eléctrica;
- f) Instalación de climatización;
- g) Instalaciones de producción de ACS y saneamiento.

Esta clasificación permite establecer cuáles son las etapas de la construcción que contribuyen de manera más significativa a las emisiones de CO₂ derivadas de los materiales utilizados en la construcción de los edificios. Siguiendo el criterio utilizado en otros estudios [87], se han agrupado los materiales básicos en un listado reducido de 21 categorías de materiales básicos: acero, adhesivo, agua, aluminio, árido, asfaltos y betunes, cal, cemento, cerámica, fibras naturales, gres, hormigón prefabricado, madera, mortero prefabricado, otros metales, pinturas, plásticos y resinas, PVC, terrazo, vidrio y yeso. Este listado facilita en gran medida el tratamiento de los datos.

-Para el análisis de las emisiones de CO₂ de la fase operacional, ha sido necesario llevar a cabo previamente un análisis de los consumos energéticos de los edificios analizados. Dichos datos de consumo pudieron ser adquiridos para dos de los hoteles analizados en la fase de construcción a partir de una visita a los establecimientos (en adelante, hotel 1 y hotel 2). El tercero de los hoteles analizados no se encontraba en funcionamiento en el momento de la realización del estudio y, por tanto, no se pudieron obtener datos reales para esta fase del ciclo de vida. El estudio se ha complementado, además, con el análisis de los datos de consumo energético de una muestra de 31 hoteles situados en las Islas Baleares con el fin de obtener una comparativa. En el caso de los hoteles 1 y 2, se ha propuesto, además, un escenario de modificación de los consumos energéticos para un periodo de tiempo de 50 años. Para la obtención de sus emisiones de CO₂ derivadas del consumo de gasoil, GLP y gas natural, se ha hecho uso de coeficientes de conversión de energía final a emisiones de CO₂ publicados. En el caso de los consumos eléctricos, la falta de valores para dicho coeficiente en muchos de los años evaluados ha hecho necesario llevar a cabo una estimación de los mismos, en función de los datos disponibles para cada periodo.

-Para el análisis de la fase de reformas se han establecido las reformas básicas que serían necesarias para el mantenimiento de un edificio hotelero en el tiempo de vida considerado. La energía utilizada en esta fase recibe el nombre de energía cautiva recurrente (“REE”, por sus siglas en inglés) [32]. Esta fase aparece incluida en la fase de utilización en la mayoría de los estudios. En este análisis, sin embargo, se ha analizado de manera independiente para obtener los valores de emisiones de CO₂ asociados a las renovaciones básicas y reformas llevadas a cabo en edificios del sector hotelero. Los datos han sido obtenidos de los proyectos de reforma de algunos de los hoteles analizados. Dichas reformas básicas son las que se enumeran a continuación: reforma de baños e instalación de lampistería, reforma de las cocinas, cambio de la instalación de aire acondicionado, renovación de la pintura de todos los paramentos, reducción de las habitaciones y reformas de adaptación a las normativas. En estas últimas se han tenido en cuenta la reforma de adaptación de baños para personas con minusvalía y las instalaciones contraincendios.

-El análisis de la fase de demolición se ha llevado a cabo para los tres hoteles analizados en la fase de construcción. Debido a que los hoteles aún se encuentran en funcionamiento, esta fase no se ha podido analizar con datos reales. Por tanto, para su análisis se ha llevado a cabo una estimación a partir de los materiales de construcción incluidos en los edificios.

Las herramientas utilizadas para el análisis de las fases de construcción, reformas y demolición han sido: TCQ2000 y TCQGMA, así como la base de datos BEDEC PR/PCT [80] del Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña (ITeC), ya definidos en la sección de Metodología general de este documento. Los resultados de este capítulo se han presentado en función del m² de superficie construida, para permitir la comparación de los resultados obtenidos con los de otros autores. El análisis llevado a cabo y los resultados obtenidos para las fases de construcción y demolición de los edificios fueron publicados en la revista *Energy and Buildings* [88]. La estimación del factor de emisión de CO₂ para la generación eléctrica en Baleares, así como la propuesta del escenario de variación de los consumos energéticos en la fase operacional son una aportación nueva al análisis. Por cuestiones de confidencialidad, no se han aportado los nombres o ubicaciones específicas de los diferentes hoteles incluidos en el estudio.

Casos de estudio

A continuación se muestra una descripción de los edificios hoteleros analizados en este estudio:

-Hotel 1: se trata de un hotel de playa de los años 80, abierto seis meses al año, que consta de cuatro plantas. Las paredes son de bloques de hormigón con aislante de espuma de poliuretano y acabado interior de yeso. El sistema de aire acondicionado consta de unidades de enfriamiento de agua condensadas por aire y fan-coils. Se utilizan calderas de gasoil para la calefacción del edificio. Este hotel dispone de instalación solar térmica para el agua caliente sanitaria (ACS) que cubre el 75% de la demanda.

-Hotel 2: se trata de un hotel de playa de los 80 que permanece abierto 9 meses al año. Dispone de cuatro plantas y la construcción es básicamente de mampostería de hormigón. El acabado interior de las paredes es de yeso y el acabado exterior de las fachadas, de granito. El sistema de aire acondicionado se compone de unidades refrigerantes de agua condensadas por aire y fan-coils. Este hotel dispone de instalación de calefacción central con dos calderas de gasoil.

-Hotel 3: se trata de un hotel de ciudad de cuatro plantas, en construcción en el momento de la realización del estudio, con una previsión de apertura anual de 12 meses. Las paredes son de bloques de cerámica o de hormigón con aislante de lana de roca. El sistema de climatización es de caudal variable con bombas de calor. Se han analizado las fases de construcción y demolición de este hotel.

Límites del estudio

Se han dejado fuera de los límites del sistema de estudio el mobiliario, los mantenimientos de los equipos y los desplazamientos en avión, en barco y en coche de los turistas. La base de datos utilizada no tiene en cuenta el transporte de los materiales de construcción al punto de consumo.

Resultados

Análisis de la fase de construcción

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para la fase de construcción de los hoteles 1, 2 y 3 ya definidos en la sección de Metodología.

1. Recursos materiales en la fase de construcción

Respecto a la masa total del edificio se ha obtenido un valor de 1.671,01 kg/m² para el hotel 1, de 1.694,70 kg/m² para el hotel 2 y de 1.839,59 kg/m² para el hotel 3. La diferencia obtenida en los resultados viene determinada por el año de construcción de los edificios. Hay que tener en cuenta que con el paso de los años la construcción ha ido evolucionando de tal manera que se están utilizando en la actualidad una mayor cantidad de materiales. Los resultados obtenidos se hallan en consonancia con los obtenidos en otros estudios, como uno realizado en la Isla de Lanzarote [87] en el que la cantidad de materiales de construcción en los edificios analizados se encuentra entre los 1.500 y los 3.000 kg/m². Otro estudio realizado en la Universidad de Michigan muestra un resultado de 1.992,74 kg/m² [35]. En la Figura 1.1. se muestra la diferente participación de los materiales de construcción a la masa del edificio, expresada en unidades de masa por m² de superficie construida. A partir de los resultados obtenidos se observa que, en general, los diferentes grupos de materiales presentan participaciones similares en los tres casos analizados. Se observa también que los materiales que más contribuyen a la masa del edificio son los áridos, con una participación que supera el 50% de la masa total, seguidos del cemento y el mortero prefabricado. Hay, en cambio otros grupos de materiales, cuya participación difiere de manera significativa en los tres casos, entre ellos se encuentran el hormigón prefabricado, el yeso y los materiales cerámicos.

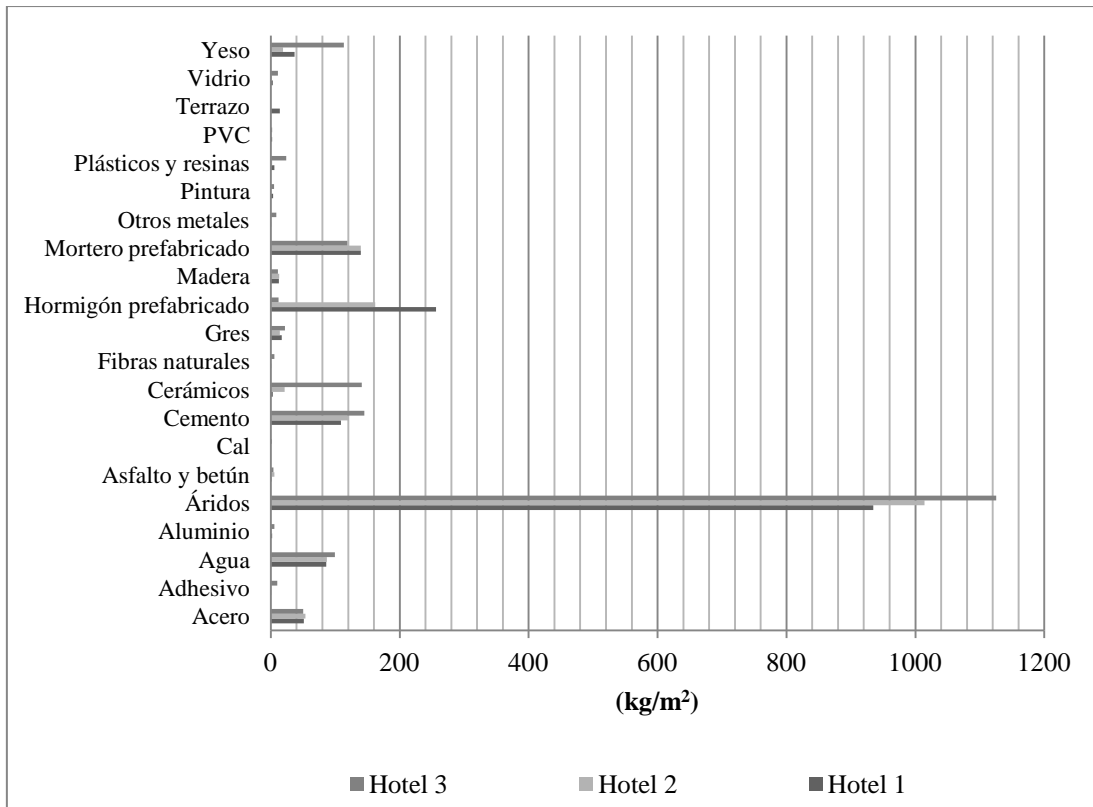


Figura 1.1. Masa de los materiales básicos por m² de superficie construida.

Si se atiende a los capítulos, definidos con anterioridad en la sección de Metodología, se puede observar la diferente participación a la masa total de los materiales que intervienen en cada uno de ellos. Los resultados se muestran en la Figura 1.2. En los casos analizados se ha observado que entre el 45% y el 50% del total de la masa de los edificios viene determinada por los materiales que conforman su estructura. Los componentes derivados de las instalaciones de climatización, producción de ACS y saneamiento han mostrado una participación situada entre el 0,27% al 0,43% del total de la masa. Al añadir a estas instalaciones los materiales correspondientes al sistema eléctrico del edificio, se ha observado que la participación es inferior al 1,5% en todos los casos. Este resultado concuerda con el de otros estudios en el que se obtiene una participación del 1,14% [87].

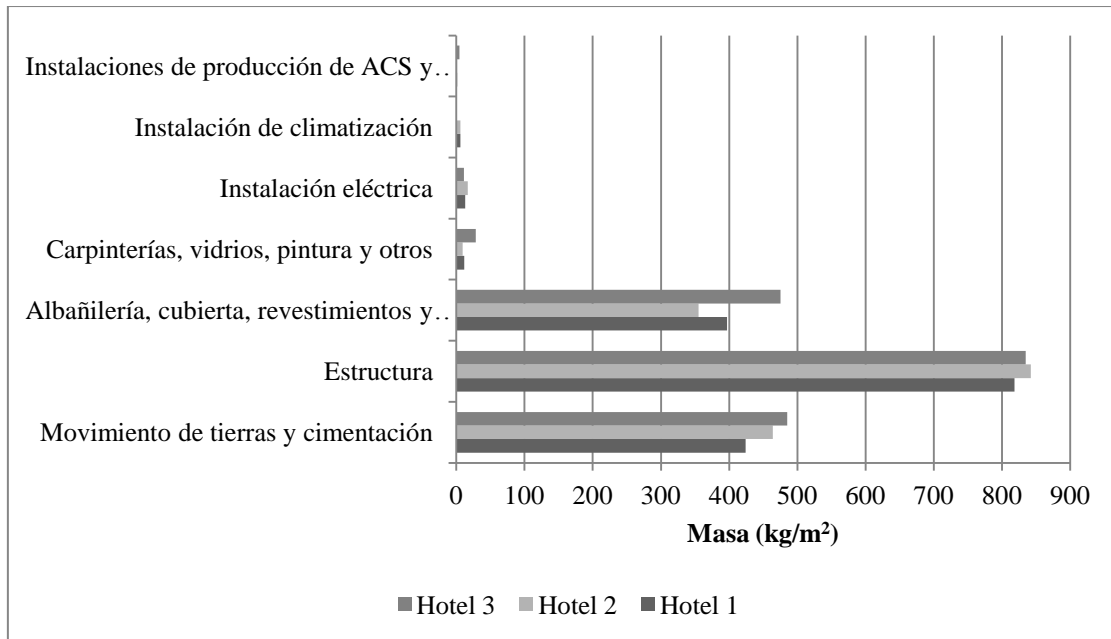


Figura 1.2. Masa por m² de superficie construida de los capítulos definidos en la fase de construcción.

2. Emisiones de CO₂ en la fase de construcción

Las emisiones de CO₂ obtenidas para la fase de construcción han sido de 601,44 kgCO₂/m² para el hotel 1, de 544,54 kgCO₂/m² para el hotel 2 y de 585,12 kgCO₂/m² para el hotel 3. En los tres casos se ha observado que entre el 87% y el 98% de las emisiones de CO₂ totales en esta fase se corresponde con los procesos de extracción, transporte y fabricación de los materiales, en adelante “emisiones de CO₂ cautivas iniciales” (IECO₂, por sus siglas en inglés). Los procesos de construcción del edificio constituyen el tanto por ciento restante (ver Figura 1.3.).

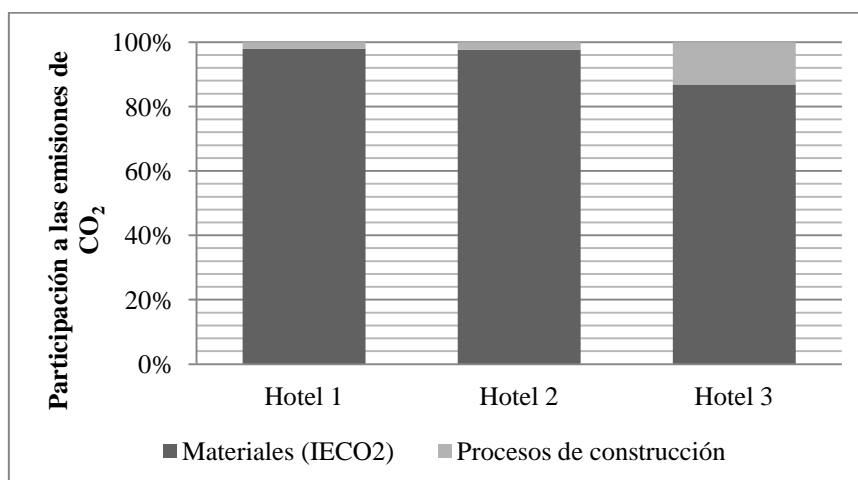


Figura 1.3. Participación de los materiales y los procesos constructivos a las emisiones de CO₂ totales de la fase de construcción.

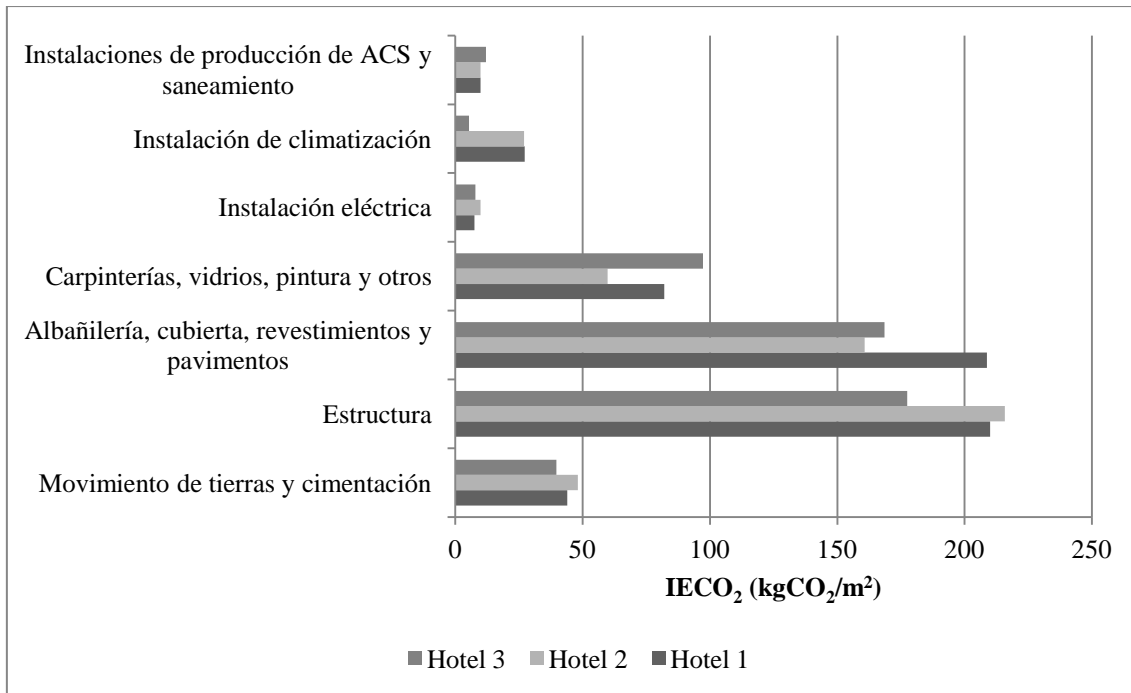


Figura 1.4. IECO₂ por m² de superficie construida.

Respecto a los capítulos definidos para la fase de construcción se ha observado que la mayor aportación a las emisiones de CO₂ corresponde a los materiales que componen la estructura del edificio (ver Figura 1.4.). Se ha observado también que los materiales relacionados con el capítulo de cimentación, que suponían entre el 25% y el 27% de la masa total, presentan un valor de emisiones situado entre el 7,5% y el 9% de las IECO₂ totales. En cuanto al capítulo de carpinterías y vidrios, se ha observado que su participación a las IECO₂ se encuentra entre el 11% y el 19%, mientras que su participación a la masa estaba próxima al 1%. Los materiales que componen las instalaciones de los edificios, con una participación a la masa total situada entre el 0,9% y el 1,4%, han mostrado participación a las IECO₂ situada entre el 5% y el 9%.

En la Figura 1.5. se muestran los materiales específicos que contribuyen en más de un 5% a las IECO₂ totales en alguno de los tres hoteles analizados. Se ha observado que hay materiales que presentan valores de emisiones muy elevados. El aluminio es un ejemplo de ello, con un valor de 33,24 kgCO₂/kg en caso de ser anodizado y de 32,18 kgCO₂/kg en caso de ser lacado. Otros materiales como el cemento o el mortero prefabricado tienen asociados valores de emisión muy inferiores, de 0,83 kgCO₂/kg y 0,22 kgCO₂/kg, respectivamente. La cerámica, por su parte, presenta un valor de 0,21 kgCO₂/kg, el yeso laminado de 0,36 kgCO₂/kg y el hormigón celular prefabricado de 0,46 kgCO₂/kg. El acero y la resina sintética presentan valores de emisión superiores, de 2,82 kgCO₂/kg y 13,7 kgCO₂/kg, respectivamente.

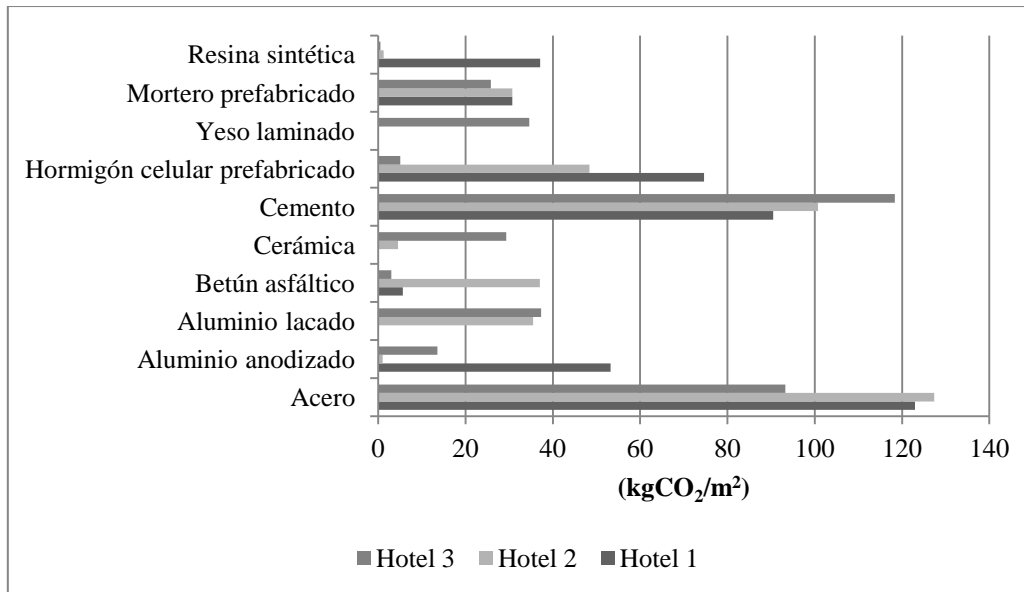


Figura 1.5. Emisiones de CO₂ por m² de superficie construida de aquellos materiales específicos que contribuyen en más de un 5% a las IECO₂ totales en alguno de los tres hoteles analizados.

Análisis de la fase operacional

1. Análisis de los consumos energéticos en la fase operacional

Tal como se indicó en el apartado de Metodología, los datos de consumo energético de los hoteles 1 y 2 se obtuvieron a partir de encuestas realizadas en los propios establecimientos y se corresponden con el año 2007 (ver Tabla 1.1). A partir de dichos datos, se ha observado que en los hoteles analizados el consumo de electricidad es superior al resto de consumos del edificio. El valor de consumo energético en hoteles viene determinado, entre otros factores, por los valores de ocupación anual, por la zona climática donde se hallan situados y por el número de meses que permanecen abiertos anualmente. Estos factores deben ser tenidos en cuenta a la hora de establecer comparaciones. Deng y Burnett [38], por ejemplo, llevaron a cabo un estudio sobre el comportamiento energético de hoteles situados en China y obtuvieron un valor medio de consumo energético de 564 kWh/m². Bohdanowicz y Martinac [42], por su parte, analizaron un conjunto de 73 hoteles Hilton y 111 hoteles Scandic situados en Europa y obtuvieron valores medios de consumo de 364,3 kWh/m² y 285,0 kWh/m², respectivamente. En el marco del Proyecto XENIOS [37] se llevaron a cabo una serie de auditorías energéticas en hoteles y los valores de consumo anual obtenidos fueron de 215 kWh/m² para un hotel situado en Francia, de 174 kWh/m² para un hotel situado en Grecia, de 280 kWh/m² para un hotel situado en Italia y de 287 kWh/m² para un hotel en España. Con el fin de llevar a cabo una comparativa de los valores de consumo de los hoteles 1 y 2, se han recopilado los datos de consumo energético de una muestra de 31 hoteles, obtenidos de auditorías energéticas llevadas a cabo en una colaboración entre la Dirección General de Energía y la Universidad de las Islas Baleares entre los años 2001 y 2003 [89]. La muestra consta de 20 hoteles de tres estrellas y 11 hoteles de cuatro estrellas. Todos ellos son hoteles de playa. Una caracterización de la muestra se

presenta en la Tabla 1.2. En el momento de realización de las auditorías, todos los establecimientos estaban equipados con sistemas centralizados de climatización con enfriadoras y con fan-coils como unidades terminales. Prácticamente todos ellos estaban equipados con calderas de gasoil para calefacción y disponían de un sistema centralizado para el agua caliente sanitaria (ACS). En el momento de realización del estudio sólo uno de los hoteles estaba equipado con una instalación solar térmica para ACS. Aunque esta situación, se habrá visto modificada en el presente, la falta de datos disponibles de consumo energético en hoteles situados en las Islas Baleares, ha forzado a utilizar dichos datos.

Tabla 1.1. Consumos energéticos de los hoteles 1 y 2.

Consumos energéticos	Hotel 1		Hotel 2	
	(kWh/m ²)	(%)	(kWh/m ²)	(%)
Electricidad	74,44	67,76	95,24	55,94
Gas propano (GLP)	8,61	7,84	11,99	7,04
Gasoil	26,81	24,40	63,02	37,02
Total	109,86	100	170,25	100

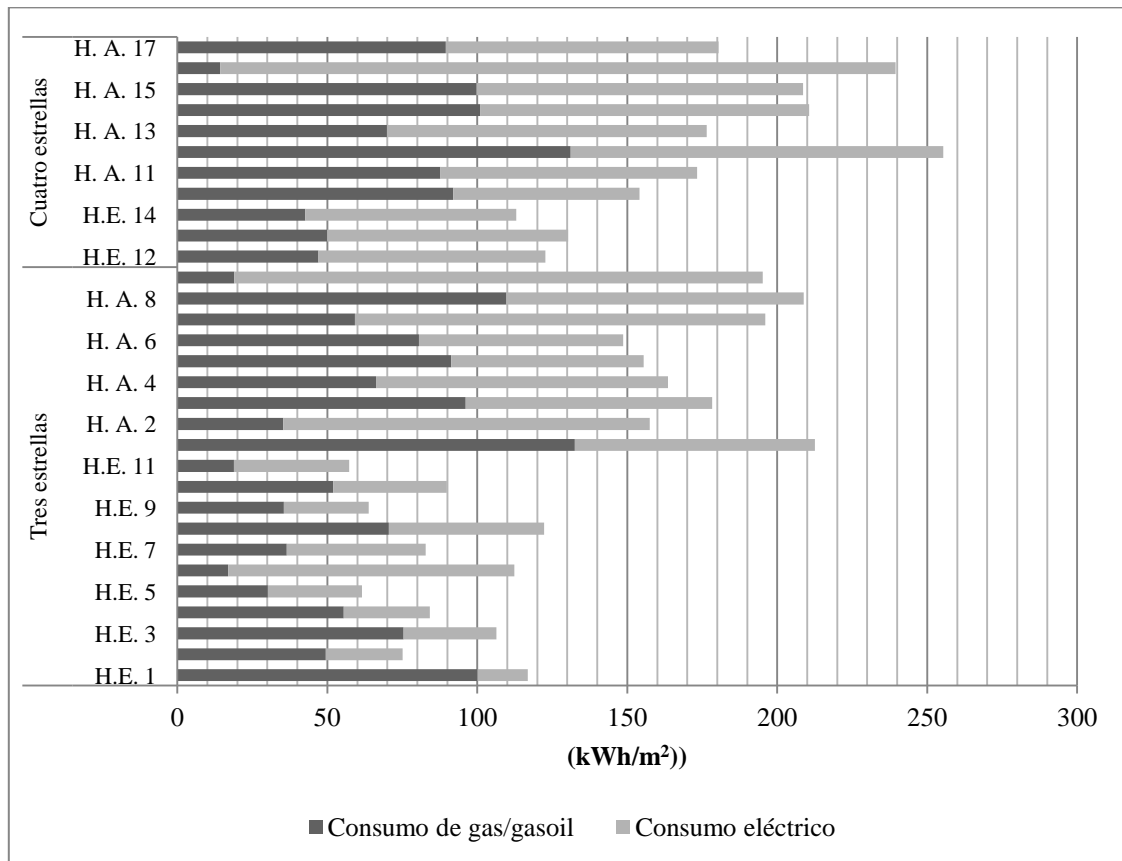
Tabla 1.2. Caracterización de una muestra de 31 hoteles de playa situados en las Islas Baleares [89].

	Intervalo
Año de construcción	1953-1994
Superficie construida (m²)	3600-13942
Número de camas	195-1150

(Fuente: [89]; realización propia).

Los 31 hoteles de la muestra no están abiertos los mismos meses al año. Por tanto, con el fin de poder llevar a cabo una comparativa, y a falta de datos de consumo mensuales, se han clasificado los hoteles en estacionales (abiertos 6 meses al año) y anuales (abiertos más de 10 meses al año). Los valores de consumo energético se muestran por m² de superficie construida para facilitar las comparaciones (ver Figura 1.6.). En la Tabla 1.3. se muestran la mediana (promedio), la media y la desviación estándar de los valores de consumo energético de la muestra de hoteles. Teniendo en cuenta los valores promedio, se ha observado que los hoteles de cuatro estrellas presentan un mayor consumo anual, tanto para los hoteles estacionales como para los hoteles anuales. Aunque este hecho parece una consecuencia de la mayor oferta de servicios proporcionados por dichos establecimientos, no siempre se puede establecer una relación directa entre el consumo energético y la categoría de los hoteles, tal como demostraron Shi-Ming Deng y Burnett [38]. Se ha observado, además, que el consumo eléctrico representa en promedio más del 50% del consumo total en todos los casos, excepto en el caso de los hoteles de tres estrellas estacionales. En concordancia con la clasificación hecha, los hoteles 1 y 2 estarían incluidos en el grupo de hoteles estacionales. Comparando los valores de consumo de estos dos hoteles con los obtenidos para la muestra se ha observado que en el caso del hotel 1, el consumo energético anual representa un 90% del consumo promedio obtenido para la muestra de

hoteles estacionales de cuatro estrellas. El consumo eléctrico y el consumo de gas/gasoil son un 1,4% inferior y un 23,8% inferiores, respectivamente. Hay que tener en cuenta que el hotel 1 cubría el 75% de su demanda de ACS con una instalación solar térmica en el momento de realización del estudio. En el caso del hotel 2, el valor de consumo total es un 39,5% superior al valor promedio obtenido para la muestra de hoteles de cuatro estrellas estacionales.



(*) H. A.: hotel anual; H.E.: hotel estacional. (Fuente: [89]; elaboración propia).

Figura 1.6. Consumo energético de una muestra de 31 hoteles situados en las Islas Baleares.

Tabla 1.3. Media, mediana y desviación estándar del consumo energético de una muestra de 31 hoteles situados en las Islas Baleares.

	Hoteles estacionales		Hoteles anuales	
	Tres estrellas	Cuatro estrellas	Tres estrellas	Cuatro estrellas
Consumo energético (kWh/m ²)	Media	88,4	122,0	179,6
	Mediana	84,2	122,7	178,4
	Desviación estándar	23,2	8,7	24,4

Consumo de gas/gasoil (kWh/m ²)	Media	49,2	46,5	76,7	85,7
	Mediana	49,5	47,0	80,6	90,7
	Desviación estándar	25,4	3,6	35,8	33,6
Consumo eléctrico (kWh/m ²)	Media	39,2	75,5	102,9	114,1
	Mediana	31,4	75,7	97,3	107,7
	Desviación estándar	21,0	5,1	36,4	48,7
Consumo de gas/gasoil (%)	Media	54,6	38,1	42,7	44,1
	Mediana	57,6	38,3	52,5	48,8
	Desviación estándar	19,2	0,3	18,2	16,4
Consumo eléctrico (%)	Media	45,4	61,9	57,3	55,9
	Mediana	42,4	61,7	47,5	51,2
	Desviación estándar	19,2	0,3	18,2	16,4

2. Propuesta de escenario de variación del consumo energético

A partir de los datos de consumo energético disponibles para los hoteles 1 y 2, se ha hecho una propuesta de escenario para analizar la variación de dichos consumos en el periodo 1980-2030. Este escenario se ha basado en el análisis sobre consumos energéticos de hoteles situados en las Islas Baleares, llevado a cabo por Moilà en [90]. Para la creación del escenario se han utilizado datos estadísticos de ocupación media en las Islas Baleares publicados por el Instituto de Estadística de las Islas Baleares [91] para el periodo 1998-2015. A falta de datos reales, los valores de ocupación para los periodos 1980-1998 y 2016-2030 han sido igualados a sus periodos inmediatamente posterior y anterior, respectivamente. Respecto a los valores de consumo energético, se ha considerado que durante el periodo 1980-1998 éste era un 15% inferior al correspondiente al periodo 1999-2015, en función de la menor oferta de servicios de las instalaciones turísticas en esa época. Siguiendo la práctica habitual en este tipo de establecimientos [55], se ha considerado para el periodo 2008-2030 una reducción del consumo eléctrico situada entre el 25% y el 30% para ambos hoteles, un cambio de gasoil a gas natural con una mejora de la eficiencia en las calderas de 0,8 a 0,95, un incremento del coeficiente de operatividad (COP) de los equipos de aire acondicionado de 2,5 a 3,5, así como una aportación del 70% de energía solar térmica para ACS. En la Figura 1.7. se muestra el escenario de variación propuesto para el consumo energético de los hoteles 1 y 2, en el periodo 1980-2030.

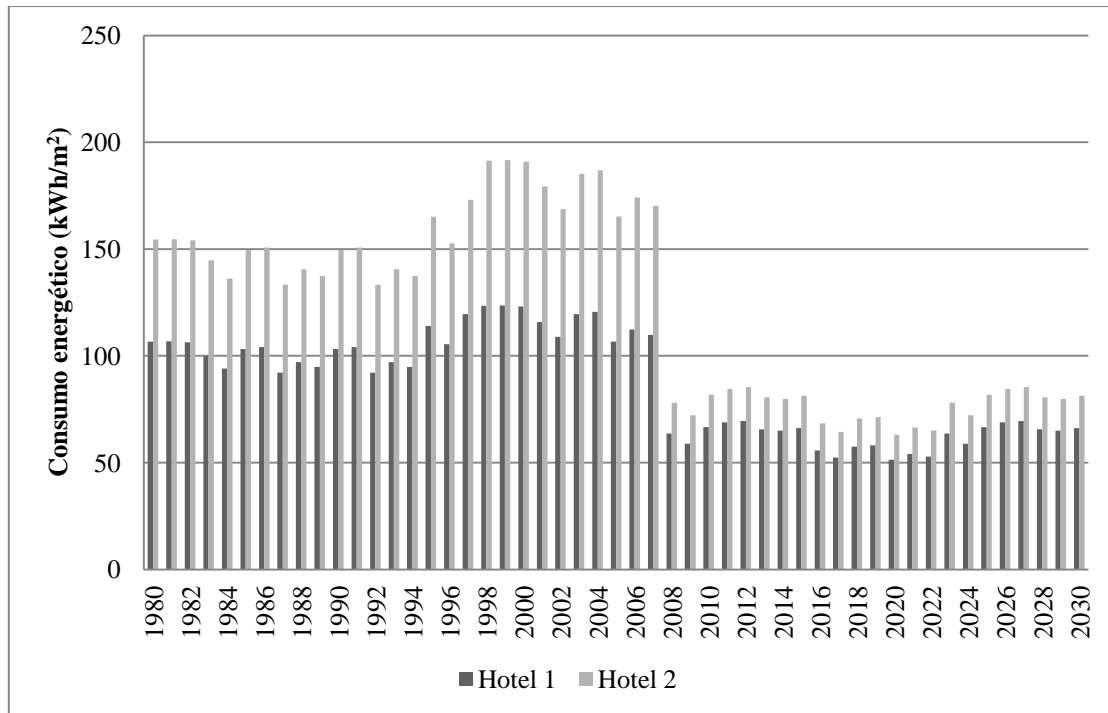


Figura 1.7. Escenario de variación del consumo energético de los hoteles 1 y 2 propuesto para el análisis.

3. Análisis de las emisiones de CO₂ en la fase operacional

3.1. Factores de emisión de CO₂

Para poder llevar a cabo el cálculo de las emisiones de CO₂ en la fase operacional, se hace necesario disponer de los factores de emisión de CO₂ de cada uno de los consumos energéticos de los hoteles 1 y 2. Acerca de estos factores, Molenbroek et al. [92], publicaron en 2011 un estudio en el que se discute acerca de la falta de una metodología unificada para el cálculo de los coeficientes de conversión en las normativas europeas. En el caso concreto de España, estos autores hacen alusión a que hasta la fecha de publicación de su estudio, no se había proporcionado el algoritmo de cálculo de los valores utilizados en las herramientas de certificación energética de edificios. Con posterioridad a este estudio, en marzo de 2014, el IDAE publicó una actualización de los factores de emisión de CO₂ asociados a los diferentes consumos energéticos en edificios, así como una metodología de cálculo detallada para su obtención en el caso de la producción de energía eléctrica en España [93]. En la Tabla 1.4. se muestran los valores publicados por el IDAE [93], junto con los valores utilizados hasta el momento de la realización de este estudio en las herramientas de certificación CALENER [92].

Tabla 1.4. Factores de conversión a emisiones de CO₂.

	CALENER	Valores propuestos IDAE
	Factor de emisión de CO₂ (kgCO₂/kWh e.f.^(*))	Factor de emisión de CO₂ (kgCO₂/kWh e.f.)
Electricidad peninsular ^(**)	0,649	0,372
Electricidad Baleares ^(**)	0,981 ^(***)	0,960
Gasóleo calefacción	0,287	0,311
GLP	0,244	0,254
Gas natural	0,204	0,252

(*) e.f.: energía final; (**) Valor medio para el periodo 2005-2011; (***) Correspondiente a todo el sistema extra-peninsular (Baleares, Canarias, Ceuta y Melilla) (Fuente: [92]; [93]; cálculos propios).

Los factores de emisión de CO₂ relacionados con el consumo de gasoil, GLP y gas natural utilizados en los cálculos se corresponden con los mostrados en la Tabla 1.4. Los valores correspondientes a los programas CALENER han sido utilizados para el cálculo llevado a cabo durante el periodo 1980-2004. Los valores actualizados del IDAE [93] se han utilizado en el cálculo de las emisiones de CO₂ en el periodo 2005-2030.

Respecto al consumo eléctrico, se hace necesario conocer los factores de emisión de CO₂ relacionados con la generación eléctrica en las Baleares para el periodo 1980-2030. Se ha observado, sin embargo, que los únicos valores publicados para dichos factores son los mostrados en la Tabla 1.4., entre los cuales, los correspondientes al periodo anterior al año 2005 se presentan como valor promedio para todo el sistema extrapeninsular (Baleares, Canarias, Ceuta y Melilla). Para los periodos 1980-2004 y 2012-2030 no se dispone de datos específicos para la generación eléctrica balear. Por esta razón, se presenta en este subapartado un cálculo y estimación de los mismos, en función de los datos disponibles para cada uno de los años evaluados. Las publicaciones estadísticas utilizadas para el estudio se muestran a continuación:

-“Libro de la Energía en España” de la Secretaría de Estado de Energía del Ministerio de Industria, Energía y Turismo de España [94]: se trata de una publicación periódica publicada anualmente que presenta, entre otros, un análisis de los balances energéticos nacionales para el año evaluado. Las publicaciones se encuentran disponibles para el periodo 2001-2013.

-“Estadístiques Energètiques Illes Balears” de la Conselleria de Treball, Comerç i Indústria del Govern de les Illes Balears (CAIB) [95]: se trata, por una parte, de una recopilación de estadísticas energéticas de las Islas Baleares (anteriormente disponibles sólo en papel) para el periodo 1983-2004 y, por otra, de las publicaciones anuales en formato digital para el periodo 2005-2010 (con datos referentes al año anterior en cada caso). En ellas se recogen los datos energéticos más relevantes de las Islas Baleares.

-“Informe del Sistema Eléctrico español” de Red Eléctrica de España (REE) [96]: se trata de una publicación anual que presenta los datos más significativos del Sector Eléctrico Español para el año evaluado. Las publicaciones abarcan el periodo 1995-2014.

Se ha observado, por una parte, que las publicaciones estadísticas son relativamente recientes en algunos casos, y, por otra, que la cantidad de información proporcionada en una misma publicación varía en algunos casos de un año a otro. Por tanto, el análisis llevado a cabo en este estudio se ha visto limitado por la disponibilidad de datos en función del año considerado, lo que ha forzado a establecer diferentes subperiodos de tiempo, tal como se especifica a continuación:

-Subperiodo 1980-1994: en este subperiodo no se han podido obtener datos de producción eléctrica en función del tipo de energía primaria en Baleares. Por tanto, se ha considerado utilizar para el cálculo los factores de emisión de CO₂ obtenidos en el subperiodo posterior, ya que como se observará más adelante, presentan una escasa variación para un periodo de tiempo de 15 años.

-Subperiodo 1995-2004: este subperiodo es el que presenta una mayor cantidad de datos disponibles en referencia a la producción y consumo de energía primaria en la generación de electricidad en Baleares. El cálculo se ha realizado siguiendo la metodología establecida por el IDAE [93].

-Subperiodo 2005-2011: se han considerado para este subperiodo los valores medios publicados por el IDAE [97] (ver Tabla 1.4.), que son específicos para la generación eléctrica en Baleares.

-Subperiodo 2012-2030: en el año 2012 entró en funcionamiento el enlace Baleares-Península (Proyecto Rómulo [98]), lo cual provocó una reducción del factor de emisión de CO₂ asociado al consumo eléctrico en Baleares, debido a la mayor aportación de energías renovables en el sistema eléctrico peninsular. Por tanto, a partir del año 2012 se han tenido en cuenta, por una parte, el factor de emisión de CO₂ del sistema de generación eléctrica balear y, por otra, el factor de emisión de CO₂ del sistema peninsular.

A continuación se muestran los cálculos detallados llevados a cabo para cada uno de los subperiodos definidos:

3.1.1. Subperiodo 1980-2004

El cálculo del valor factor de emisión de CO₂ para el consumo eléctrico en Baleares se ha llevado a cabo siguiendo la metodología publicada por el IDAE [97], con algunas diferencias que se detallarán en cada caso concreto. Los resultados se han mostrado en forma de tablas con el mismo formato que las publicadas en dicho documento.

A continuación se muestran los cálculos realizados para la obtención de los diferentes datos de las tablas así como las fuentes de donde se han obtenido los datos en cada caso:

a) Producción bruta de energía eléctrica:

Para el periodo considerado, los datos referentes a la producción bruta de energía eléctrica por tipo de energía primaria han sido obtenidos de las publicaciones de la REE [96]. Sin embargo estos datos sólo están disponibles para el periodo 1995-2004. La producción bruta de la planta incineradora de residuos sólidos urbanos (RSU) con generación de energía de Son Reus (TIRME S.A.) se ha obtenido de las “*Estadístiques Energètiques Illes Balears*” de la CAIB [95]. El hecho de utilizar datos procedentes de dos fuentes estadísticas diferentes provoca algunas diferencias en los valores totales obtenidos. El cálculo de dichas diferencias muestra que son inferiores al 0,8% al comparar el valor de producción bruta total obtenida en el cálculo con el valor proporcionado en las estadísticas de la CAIB [95].

b) Producción neta de energía eléctrica:

La producción neta por tipo de energía primaria no se encuentra disponible en las publicaciones estadísticas, por tanto, los valores de las tablas se han obtenido tal como se especifica en la Ecuación 1-1, siguiendo la metodología del IDAE [97].

Ecuación 1-1. Producción eléctrica neta.

$$\text{Producción Neta} = \text{Producción Bruta} * (1 - X/100)$$

(Fuente: IDAE [97])

donde, X es el porcentaje que el total de los consumos de generación suponen sobre la producción bruta. Los valores de los consumos de generación se han obtenido de las “*Estadístiques Energètiques Illes Balears*” de la CAIB [95].

c) Consumo final de energía eléctrica:

Para llevar a cabo el cálculo del consumo final se hace necesario conocer las pérdidas por transporte y distribución de la energía eléctrica. En el cálculo llevado a cabo por el IDAE [97] se considera el coeficiente de pérdidas establecido en la ORDEN ITC/3801/2008 de 26 de diciembre [99], del 13,81% de la energía consumida correspondiente a contratos de suministro en baja tensión (BT), por considerarse ésta la tensión de uso más común en el sector residencial [97]. Sin embargo, en este estudio los

edificios analizados no pertenecen a este sector y se ha decidido llevar a cabo el cálculo considerando las pérdidas totales en transporte y distribución proporcionadas por la CAIB en las “*Estadístiques Energètiques Illes Balears*” [95]. Por tanto, el consumo de energía eléctrica por fuentes de energía primaria ha sido obtenido tal como se muestra en la Ecuación 1-2.

Ecuación 1-2. Consumo final de energía eléctrica.

$$\text{Consumo final energía eléctrica } \left(\frac{\text{GWh}}{\text{año}}\right) = \text{Producción neta } \left(\frac{\text{GWh}}{\text{año}}\right) * \left(1 - \frac{Y}{100}\right)$$

(Fuente: IDAE [97])

donde, Y es el coeficiente de pérdidas y diferencias en distribución. En los años 1996 y 1997 no se presentaron los valores de pérdidas en las estadísticas de la CAIB, por tanto, en estos dos años dicho coeficiente ha sido obtenido a partir de los datos proporcionados en el “Informe del Sistema Eléctrico Español” publicado por la REE [96]. Los valores del coeficiente de pérdidas para los años evaluados se presentan en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5. Coeficiente de pérdidas en transporte y distribución de energía eléctrica en Baleares.

Año	Coeficiente de pérdidas en transporte y distribución	
	Y (%)	
1995	9,95	
1996^(*)	9,27	
1997^(*)	8,21	
1998	9,91	
1999	9,30	
2000	8,98	
2001	9,68	
2002	7,69	
2003	8,73	
2004	8,50	

(Fuente: cálculos propios a partir de datos de [95] y (*)[96])

d) Energía primaria en generación de electricidad:

El consumo de combustibles para generación de electricidad ha sido obtenido de las “*Estadístiques Energètiques Illes Balears*” (CAIB) [95]. En las publicaciones anuales de la REE se presentaba este consumo para las Islas Baleares en las primeras publicaciones entre los años 1995-1997. Estos consumos se presentan en las tablas en términos de (ktep/año) y (GWh/año).

e) Factores de conversión de energía final a primaria:

Los factores de conversión de energía final a energía primaria se han calculado como se especifica en la Ecuación 1-3.

Ecuación 1-3. Factor de conversión de energía final a energía primaria.

$$\text{Factor de conversión} \left(\frac{\text{tep e.p.}}{\text{MWh e e.f.}} \right) = \frac{\text{Consumo e.p. (ktep/año)}}{\text{Consumo final (GWh/año)}}$$

(Fuente: IDAE [97])

donde,

e.p.: energía primaria;

e.f.: energía final;

e: eléctrico.

Los valores totales mostrados en las tablas, en este caso concreto, se han obtenido aplicando la Ecuación 1-3 sobre los valores totales obtenidos para el consumo de energía primaria y el consumo final de electricidad.

f) Emisiones de CO₂ específicas:

Los factores de emisión de CO₂ con factor de oxidación se han obtenido del Plan de Energías Renovables (PER) 2005-2010 [100] En el documento de propuesta de metodología publicado por el IDAE [97] no se especifican los coeficientes utilizados en este cálculo ni el algoritmo utilizado. El cálculo llevado a cabo en este estudio se detalla a continuación:

En el caso del consumo de carbón ha sido necesario extraer el consumo específico de lignito, hulla, etc. para cada año utilizado ya que el factor de oxidación varía de un tipo de carbón a otro. Los datos de consumo han sido extraídos de las “*Estadístiques Energètiques*” de la CAIB [95]. A partir de esta publicación se ha podido observar que en las Islas Baleares entre los años 1984 y 1992 (ambos incluidos) había consumo de lignito mallorquín, lignito nacional y otros carbones importados que no aparecen especificados [95]. A partir del año 1993 el consumo de carbón se limita a la hulla importada. El factor de emisión con factor de oxidación utilizado para la hulla ha sido de 0,3467 tCO₂/MWh [100]. En el caso de los productos petrolíferos (fueloil y gasoil), el cálculo de las emisiones específicas se ha realizado con los porcentajes de consumo de ambos combustibles dentro de este grupo y el factor de emisión con oxidación específico de cada uno de ellos. Los factores utilizados han sido: 0,2640 tCO₂/MWh (gasoil) y 0,2758 tCO₂/MWh (fueloil) [100]. En el caso de las fuentes de energía renovables se ha considerado el factor de emisión asociado por el IDAE [97], de 0 tCO₂/MWh. Los valores totales para las emisiones específicas se han obtenido como media ponderada para cada subgrupo (no renovables y renovables), teniendo en cuenta los porcentajes parciales de participación del consumo de cada tipo de energía primaria sobre el consumo total.

g) Factor de conversión de energía final a emisiones de CO₂:

Los factores de conversión de energía final a emisiones de CO₂ específicos y totales se han obtenido multiplicando las emisiones de CO₂ específicas por el factor de conversión de energía final a energía primaria.

En las Tablas 1.6.-1.15 se muestran los cálculos realizados y los resultados obtenidos para el periodo 1995-2004.

TOTAL no renovables	3315	3102	2814	756	8788	0,269	3,123	0,315	0,983
Hidroeléctrica	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Otros (biomasa, RSU, eólica y solar fotovoltaica)	25	23	20	13	153	0,655	7,612	0	0
TOTAL renovables	25	23	20	13	153	0,655	7,612	0	0
TOTAL (no renovables y renovables)	3340	3125	2834	769	8941	0,271	3,155	0,309	0,976

(Fuente: [94], [95], [98], [92]; cálculos propios)

Tabla 1.8. Cálculo del factor de emisión de CO₂ para la generación eléctrica en Baleares en el año 1997.

Islas Baleares 1997	Producción de energía eléctrica		Consumo final (GWh/año)	Consumo de energía primaria para generación de electricidad		Factor de conversión de energía final a energía primaria		Emisiones de CO ₂ específicas (tCO ₂ /MWh e.p.)	Factor de conversión de energía final a emisiones de CO ₂ (tCO ₂ /MWh)
	Producción bruta (GWh/año)	Producción bruta (GWh/año)		(ktep/año)	(GWh/año)	(tep e.p./MWh e.e.f.)	(MWh t e.p./MWh e.e.f.)		
Carbón	2282	2111	1938	474	5509	0,244	2,842	0,347	0,986
Petróleo (fuel-oil y gas-oil)	1225	1133	1040	336	3910	0,323	3,759	0,275	1,033
Gas natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0
nuclear	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL no renovables	3507	3245	2979	810	9419	0,272	3,162	0,317	1,002
Hidroeléctrica	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Otros (biomasa, RSU, eólica y solar fotovoltaica)	121	112	97	43	502	0,447	5,2	0	0
TOTAL renovables	121	112	97	43	502	0,447	5,2	0	0
TOTAL (no renovables y renovables)	3628	3357	3075	853	9921	0,277	3,226	0,301	0,971

(Fuente: [93], [95], [96], [100]; cálculos propios)

TOTAL no renovables	4222	3890	3528	956	11116	0,271	3,150	0,332	1,045
Hidroeléctrica	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Otros (biomasa, RSU, eólica y solar fotovoltaica)	160	147	127	58	676	0,458	5,320	0	0
TOTAL renovables	160	147	127	58	676	0,458	5,320	0	0
TOTAL (no renovables y renovables)	4382	4038	3655	1014	11792	0,277	3,226	0,313	1,009

(Fuente: [93], [95], [96], [100]; cálculos propios)

Tabla 1.11. Cálculo del factor de emisión de CO₂ para la generación eléctrica en Baleares en el año 2000.

Islas Baleares 2000	Producción de energía eléctrica		Consumo final (GWh/año)	Consumo de energía primaria para generación de electricidad		Factor de conversión de energía final a energía primaria (tep e.p./MWh e e.f.)	Factor de conversión de energía final a energía primaria (MWh t e.p./MWh e e.f.)	Emisiones de CO ₂ específicas (tCO ₂ /MWh e.p.)	Factor de conversión de energía final a emisiones de CO ₂ (tCO ₂ /MWh)
	Producción bruta (GWh/año)	Producción bruta (GWh/año)		(ktep/año)	(GWh/año)				
	Carbón	3472		3207	2919				
Petróleo (fuel-oil y gas-oil)	987	912	830	290	3375	0,350	4,067	0,273	1,110
Gas natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0
nuclear	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL no renovables	4459	4118	3749	1013	11782	0,270	3,143	0,326	1,023
Hidroeléctrica	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Otros (biomasa, RSU, eólica y solar fotovoltaica)	162	149	136	57	665	0,421	4,890	0	0
TOTAL renovables	162	149	136	57	665	0,421	4,890	0	0
TOTAL (no renovables y renovables)	4621	4268	3885	1070	12447	0,276	3,204	0,308	0,988

(Fuente: [93], [95], [96], [100]; cálculos propios)

Tabla 1.12. Cálculo del factor de emisión de CO₂ para la generación eléctrica en Baleares en el año 2001.

Islas Baleares 2001	Producción de energía eléctrica		Consumo final (GWh/año)	Consumo de energía primaria para generación de electricidad		Factor de conversión de energía final a energía primaria		Emisiones de CO ₂ específicas (tCO ₂ /MWh e.p.)	Factor de conversión de energía final a emisiones de CO ₂ (tCO ₂ /MWh)
	Producción bruta	Producción bruta		(ktep/año)	(GWh/año)	(tep e.p./MWh e e.f.)	(MWht e.p./MWh e e.f.)		
	(GWh/año)	(GWh/año)		(ktep/año)	(GWh/año)	(tep e.p./MWh e e.f.)	(MWht e.p./MWh e e.f.)		
Carbón	3673	3405	3076	747	8688	0,243	2,825	0,347	0,979
Petróleo (fuel-oil y gas-oil)	1140	1057	955	366	4255	0,383	4,458	0,272	1,214
Gas natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0
nuclear	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL no renovables	4813	4462	4030	1113	12943	0,276	3,211	0,322	1,035
Hidroeléctrica	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Otros (biomasa, RSU, eólica y solar fotovoltaica)	171	159	143	60	699	0,420	4,885	0	0
TOTAL renovables	171	159	143	60	699	0,420	4,885	0	0
TOTAL (no renovables y renovables)	4984	4621	4173	1173	13642	0,281	3,269	0,306	0,9996

(Fuente: [93], [95], [96], [100]; cálculos propios)

Tabla 1.13. Cálculo del factor de emisión de CO₂ para la generación eléctrica en Baleares en el año 2002.

Islas Baleares 2002	Producción de energía eléctrica		Consumo final (GWh/año)	Consumo de energía primaria para generación de electricidad		Factor de conversión de energía final a energía primaria		Emisiones de CO ₂ específicas (tCO ₂ /MWh e.p.)	Factor de conversión de energía final a emisiones de CO ₂ (tCO ₂ /MWh)
	Producción bruta	Producción bruta		(ktep/año)	(GWh/año)	(tep e.p./MWh e e.f.)	(MWht e.p./MWh e e.f.)		
	(GWh/año)	(GWh/año)		(ktep/año)	(GWh/año)	(tep e.p./MWh e e.f.)	(MWht e.p./MWh e e.f.)		
Carbón	3542	3295	3042	738	8580	0,243	2,821	0,347	0,978
Petróleo (fuel-oil y gas-oil)	1372	1276	1178	398	4631	0,338	3,931	0,272	1,068

Gas natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0
nuclear	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL no renovables	4914	4572	4220	1136	13211	0,269	3,131	0,320	1,003
Hidroeléctrica	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Otros (biomasa, RSU, eólica y solar fotovoltaica)	137	127	118	54	632	0,462	5,370	0	0
TOTAL renovables	137	127	118	54	632	0,462	5,370	0	0
TOTAL (no renovables y renovables)	5051	4699	4338	1190	13843	0,274	3,191	0,306	0,976

(Fuente: [93], [95], [96], [100]; cálculos propios)

Tabla 1.14. Cálculo del factor de emisión de CO₂ para la generación eléctrica en Baleares en el año 2003.

Islas Baleares 2003	Producción de energía eléctrica		Consumo final (GWh/año)	Consumo de energía primaria para generación de electricidad		Factor de conversión de energía final a energía primaria		Emisiones de CO ₂ específicas (tCO ₂ /MWh e.p.)	Factor de conversión de energía final a emisiones de CO ₂ (tCO ₂ /MWh)
	Producción bruta	Producción bruta		(ktep/año)	(GWh/año)	(tep e.p./MWh e e.f.)	(MWh t e.p./MWh e e.f.)		
	(GWh/año)	(GWh/año)							
Carbón	3547	3315	3026	722	8396	0,239	2,775	0,347	0,962
Petróleo (fuel-oil y gas-oil)	1865	1743	1591	516	6002	0,324	3,772	0,269	1,016
Gas natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0
nuclear	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL no renovables	5412	5058	4617	1238	14398	0,268	3,119	0,314	0,981
Hidroeléctrica	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Otros (biomasa, RSU, eólica y solar fotovoltaica)	156	146	133	54	629	0,407	4,729	0	0
TOTAL renovables	156	146	133	54	629	0,407	4,729	0	0
TOTAL (no renovables y renovables)	5568	5204	4750	1292	15027	0,272	3,164	0,301	0,953

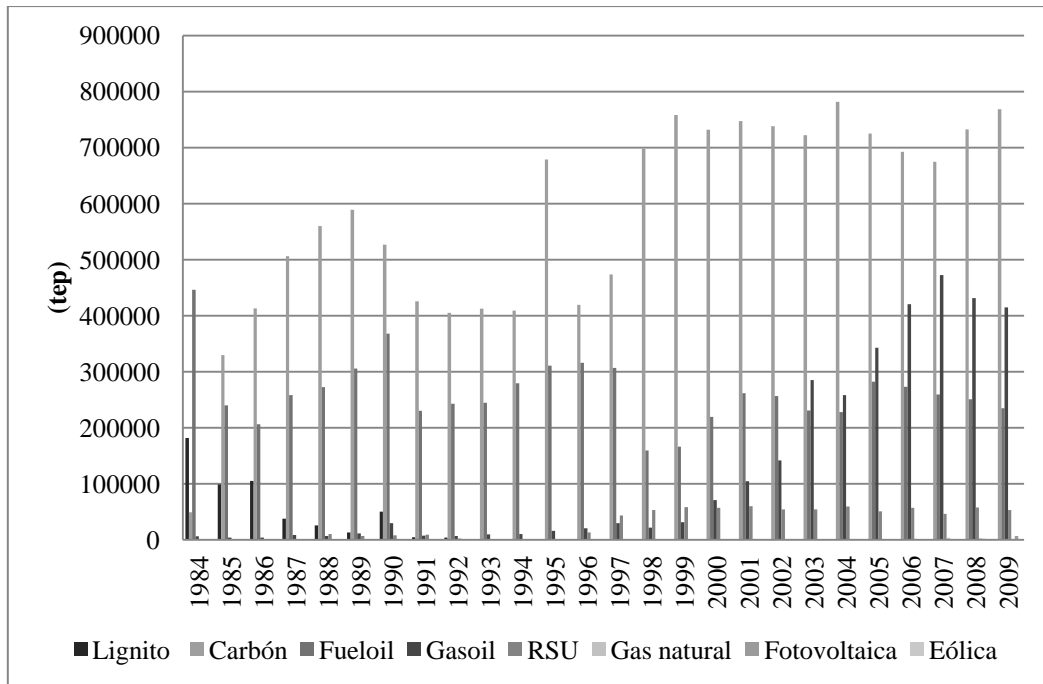
(Fuente: [93], [95], [96], [100]; cálculos propios)

Tabla 1.15. Cálculo del factor de emisión de CO₂ para la generación eléctrica en Baleares en el año 2004.

Islas Baleares 2004	Producción de energía eléctrica		Consumo final (GWh/año)	Consumo de energía primaria para generación de electricidad		Factor de conversión de energía final a energía primaria		Emisiones de CO ₂ específicas (tCO ₂ /MWh e.p.)	Factor de conversión de energía final a emisiones de CO ₂ (tCO ₂ /MWh)
	Producción bruta (GWh/año)	Producción bruta (GWh/año)		(ktep/año)	(GWh/año)	(tep e.p./MWh e.f.)	(MWh t e.p./MWh e.f.)		
Carbón	3738	3490	3194	782	9088	0,245	2,846	0,347	0,987
Petróleo (fuel-oil y gas-oil)	1875	1751	1602	486	5649	0,303	3,526	0,270	0,950
Gas natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0
nuclear	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL no renovables	5613	5241	4796	1267	14737	0,264	3,073	0,317	0,975
Hidroeléctrica	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Otros (biomasa, RSU, eólica y solar fotovoltaica)	179	167	153	59	688	0,387	4,504	0	0
TOTAL renovables	179	167	153	59	688	0,387	4,504	0	0
TOTAL (no renovables y renovables)	5792	5408	4949	1327	15425	0,268	3,117	0,303	0,945

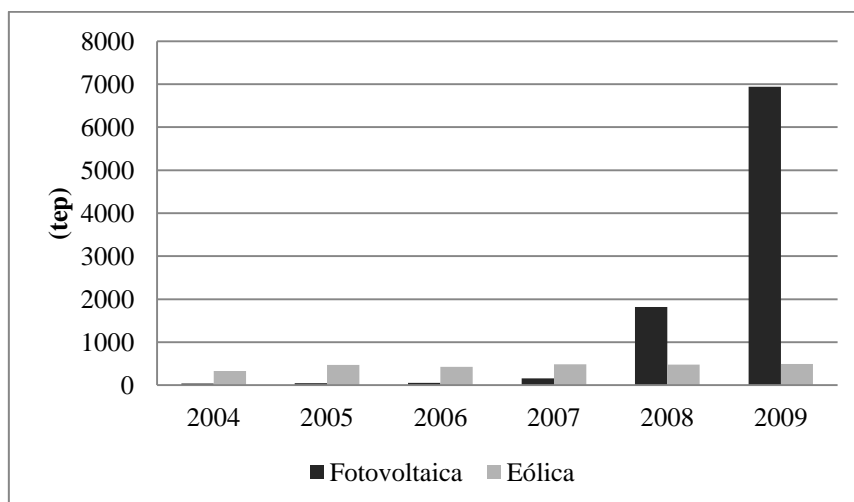
(Fuente: [93], [95], [96], [100]; cálculos propios)

A la vista de los resultados, se ha observado que para el periodo 1995-2004 la reducción obtenida para el factor de emisión de CO₂ asociado a la producción eléctrica balear ha sido del 4,6%. El elevado valor del factor de emisión de CO₂ es debido a la escasa participación histórica que las fuentes de energía renovable han tenido en la producción de energía eléctrica en Baleares. En las Figuras 1.8. y 1.9. se muestra la evolución del consumo de fuentes de energía primaria en el sistema eléctrico balear desde el año 1984 hasta el año 2009.



(Fuente: [95]; realización propia)

Figura 1.8. Consumo de energía primaria para producción de energía eléctrica en Baleares.



(Fuente: [95]; realización propia)

Figura 1.9. Consumo de energía renovable para producción eléctrica en Baleares.

Si se comparan los valores medios obtenidos para el factor de emisión de CO₂ en el periodo 1995-2004 (0,982 tCO₂/MWh) con los proporcionados por el IDAE [93] para el periodo 2005-2011 (ver Tabla 1.4.), se observa que la reducción es de sólo el 2,4%. La escasa variación a lo largo del tiempo observada en el factor de emisión de CO₂ para la generación eléctrica en Baleares ha hecho suponer que la utilización de los valores medios obtenidos para el periodo 1995-2004 supondría un error no demasiado significativo en el cálculo de las emisiones de CO₂ entre los años 1980 y 1994, periodo para el cual no se han encontrado datos de producción por fuente de energía primaria.

3.1.2. Subperiodo 2012-2030

En el año 2012 entró en funcionamiento el cable del enlace con Península-Baleares (Proyecto Rómulo [98]), reduciéndose así la producción eléctrica a partir de carbón y de ciclos combinados. A partir de ese año se han tenido en cuenta en el cálculo tanto los factores de emisión de la producción eléctrica balear como de la peninsular.

3.1.2.1. Factor de emisión de CO₂ del sistema de generación eléctrica balear

En el caso del sistema de generación eléctrica balear se ha procedido a realizar el cálculo del factor de emisión para los años 2012 y 2013, de los cuales se disponía datos en el momento de la realización de este estudio. A falta de datos disponibles y de estudios de prospectiva de generación eléctrica en Baleares, se ha utilizado a partir del año 2014 el valor promedio obtenido para el periodo 2005-2013, de 0,9494 kgCO₂/kWh_{e.f.}, adoptando así una postura conservadora basada en la escasa variación en el tiempo de los factores de emisión de CO₂ asociados a la generación eléctrica balear.

La metodología seguida para el cálculo de los factores de emisión de CO₂ en los años 2012 y 2013 ha sido la misma que la ya utilizada para el cálculo en el periodo 1995-2004, con algunas diferencias que se especificarán en cada caso concreto. El proceso llevado a cabo y el origen de los datos se especifican a continuación:

- a) Producción bruta de energía eléctrica:

Los datos de producción eléctrica bruta para los años considerados, se han obtenido de la publicación “Libro de la Energía en España” del MINETUR [94].

b) Producción neta de energía eléctrica:

El valor total de la producción neta se ha obtenido también de la publicación del MINETUR [94]. A partir de este valor y el de la producción bruta total se han calculado los consumos de generación (ver Ecuación 1-4). A continuación, siguiendo la metodología del IDAE [93] se ha aplicado la Ecuación 1-1 para obtener una estimación de la producción neta para cada tipo de energía primaria.

Ecuación 1-4. Consumos de generación en producción eléctrica.

$$\text{Producción Bruta} - \text{Producción Neta} = \text{Consumos de generación}$$

(Fuente: IDAE [93])

c) Consumo final de energía eléctrica:

El consumo final de energía eléctrica se ha calculado siguiendo la Ecuación 1-2. El valor de las pérdidas y diferencias en distribución se ha obtenido también de la publicación “Libro de la Energía en España” [94]. Los coeficientes de pérdidas (Y), calculados con respecto a la producción neta, para los años 2012 y 2013, se muestran en la Tabla 1.16.

Tabla 1.16. Coeficiente de pérdidas en transporte y distribución de energía eléctrica en Baleares para los años 2012 y 2013.

Año	Coeficiente de pérdidas en transporte y distribución Y (%)
2012	10,41
2013	10,98

d) Energía primaria en generación de electricidad:

El consumo de combustibles para generación de electricidad no aparece en las publicaciones estadísticas para los años evaluados. Por tanto, los valores de consumo se han obtenido en el caso del carbón y el gas natural a partir de los valores de producción bruta y de los rendimientos establecidos en el PER 2005-2010 [100] para diferentes tipos de centrales (ver Tabla 1.17.).

Tabla 1.17. Rendimientos por tipo de central eléctrica.

Rendimiento

Tipo de central	(%)
Central térmica de carbón	36,1
Ciclo combinado de gas natural	54

(Fuente: [100]).

En el caso del consumo de fueloil y gasoil, así como de las fuentes de energía renovable, a falta de datos disponibles, se han analizado los coeficientes de paso de consumo de energía primaria a producción bruta del subperiodo 1995-2004, evaluado en el apartado anterior. A partir de este análisis se ha observado que dichos coeficientes presentan oscilaciones de un año a otro. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1.18., junto con los valores promedio que han sido utilizados para el cálculo.

Tabla 1.18. Coeficientes de paso de consumo de energía primaria a producción eléctrica bruta calculados para el subperiodo 1995-2004.

Año	Petróleo (fuel-oil y gas-oil)	Otros (biomasa, RSU, eólica y solar fotovoltaica)
	(GWh bruto/GWh e.p.)	
1995	0,36	0
1996	0,36	0,16
1997	0,31	0,24
1998	0,33	0,22
1999	0,32	0,24
2000	0,29	0,24
2001	0,27	0,24
2002	0,30	0,22
2003	0,31	0,25
2004	0,33	0,26
Valores promedio	0,32	0,24 ^(*)

(*) Calculado desde del año 1997, ya que los valores de los dos años anteriores no son representativos.

e) Factores de conversión de energía final a primaria:

Los factores de conversión de energía final a energía primaria se han calculado tal como ya se indicó en la Ecuación 1-3.

f) Emisiones de CO₂ específicas:

El cálculo de las emisiones de CO₂ específicas se ha realizado siguiendo la misma metodología especificada en el cálculo para el subperiodo 1995-2004. La única diferencia en este caso es la presencia de gas natural como fuente de energía primaria. El factor de emisiones de CO₂ con factor de oxidación utilizado en este caso ha sido extraído del PER 2005-2010 [100] y presenta un valor de 0,201 tCO₂/MWh.

g) Factor de conversión de energía final a emisiones de CO₂:

El producto de las emisiones de CO₂ específicas por el factor de conversión de energía final a energía primaria ha permitido obtener los factores de conversión de energía final a emisiones de CO₂.

En las Tablas 1.19 y 1.20. se muestran los cálculos realizados y los resultados obtenidos para los años 2012 y 2013.

Tabla 1.19. Cálculo del factor de emisión de CO₂ para la generación eléctrica en Baleares en el año 2012.

Islas Baleares 2012	Producción de energía eléctrica		Consumo final (GWh/año)	Consumo de energía primaria para generación de electricidad		Factor de conversión de energía final a energía primaria		Emisiones de CO ₂ específicas (tCO ₂ /MWh e.p.)	Factor de conversión de energía final a emisiones de CO ₂ (tCO ₂ /MWh)
	Producción bruta	Producción bruta		(ktep/año)	(GWh/año)	(tep e.p./MWh e.f.)	(MWh t e.p./MWh e.f.)		
	(GWh/año)	(GWh/año)		(ktep/año)	(GWh/año)	(tep e.p./MWh e.f.)	(MWh t e.p./MWh e.f.)		
Carbón	2779	2608	2336	662	7698	0,2834	3,2950	0,3468	1,1426
Petróleo (fuel-oil y gas-oil)	2052	1926	1725	555	6453	0,3217	3,7409	0,2724	1,0192
Gas natural	388	364	326	62	719	0,1894	2,2028	0,2010	0,4427
nuclear	0	0	0	0	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
TOTAL no renovables	5219	4898	4388	1279	14870	0,2915	3,3891	0,3075	1,0420
Hidroeléctrica	0	0	0	0	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Otros (biomasa, RSU, eólica y solar fotovoltaica)	286	268	240	60	1150	0,2501	2,9087	0,0000	0,0000
TOTAL renovables	286	268	240	60	1150	0,2501	2,9087	0,0000	0,0000
TOTAL (no renovables y renovables)	5505	5166	4628	1339	16020	0,2893	3,3642	0,2854	0,9601

(Fuente:[93], [94]; cálculos propios)

Tabla 1.20. Cálculo del factor de emisión de CO₂ para la generación eléctrica en Baleares en el año 2013.

Islas Baleares 2013	Producción de energía eléctrica		Consumo final	Consumo de energía primaria para generación de electricidad		Factor de conversión de energía final a energía primaria		Emisiones de CO ₂ específicas	Factor de conversión de energía final a emisiones de CO ₂
	Producción bruta	Producción bruta		(GWh/año)	(ktep/año)	(GWh/año)	(tep e.p./MWh e e.f.)		
	(GWh/año)	(GWh/año)	(GWh/año)	(ktep/año)	(GWh/año)	(tep e.p./MWh e e.f.)	(MWh t e.p./MWh e e.f.)	(tCO ₂ /MWh e.p.)	(tCO ₂ /MWh)
Carbón	2432	2261	2013	579	6737	0,2878	3,3467	0,3468	1,1605
Petróleo (fuel-oil y gas-oil)	1271	1182	1052	344	3997	0,3268	3,7996	0,2724	1,0352
Gas natural	634	589	525	101	1174	0,1924	2,2374	0,2010	0,4497
nuclear	0	0	0	0	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
TOTAL no renovables	4337	4032	3590	1024	11908	0,2853	3,3173	0,3074	1,0199
Hidroeléctrica	0	0	0	0	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Otros (biomasa, RSU, eólica y solar fotovoltaica)	277	258	229	60	1113	0,2623	3,0503	0,0000	0,0000
TOTAL renovables	277	258	229	60	1113	0,2623	3,0503	0,0000	0,0000
TOTAL (no renovables y renovables)	4614	4290	3819	1084	13022	0,2839	3,3013	0,2812	0,9282

(Fuente:[93], [94]; cálculos propios)

3.1.2.2. Factor de emisión de CO₂ del sistema eléctrico peninsular

En el subperiodo 2012-2030, se han estimado los factores de emisión de CO₂ para el sistema peninsular a partir de los datos proporcionados por la Asociación Española de la Industria Eléctrica (UNESA) en la publicación “Prospectiva de generación eléctrica 2030” [101]. En este documento se analiza, entre otros, un escenario base definido por la Comisión Europea en “Trends to 2030” [102] que viene determinado por las políticas implantadas con anterioridad al año 2005. Los resultados de este análisis muestran una reducción del 50% entre los años 2005 y 2030 para el factor de conversión a emisiones de CO₂, pasándose de un valor de 0,404 kgCO₂/kWh e e.f. a un valor de 0,202 kgCO₂/kWh e e.f. A partir de estos valores, se ha realizado en el presente estudio una estimación del factor de conversión de energía final a emisiones de CO₂ para los años intermedios, que han sido utilizados en el cálculo (ver Tabla 1.21.).

Tabla 1.21. Valores para el factor de emisión de CO₂ del sistema eléctrico peninsular en el periodo 2005-2030.

Factor de conversión de energía eléctrica final a emisiones de CO₂	
Año	(kgCO₂/MWh e e.f.)
2005 ^(*)	0,404
2006	0,396
2007	0,388
2008	0,380
2009	0,372
2010	0,364
2011	0,356
2012	0,348
2013	0,339
2014	0,331
2015	0,323
2016	0,315
2017	0,307
2018	0,299
2019	0,291
2020	0,283
2021	0,275
2022	0,267
2023	0,259
2024	0,251
2025	0,242
2026	0,234
2027	0,226
2028	0,218
2029	0,210
2030 ^(*)	0,202

(Fuente: ^(*)[101]; cálculos propios).

3.1.2.3. Factor de emisión de CO₂ estimado para el consumo de energía final en Baleares a partir del año 2012

En la Tabla 1.22., se muestran los factores de emisión de CO₂ estimados para el consumo de energía final en Baleares. Para su cálculo se han tenido en cuenta los datos de participación del enlace Península-Baleares. A falta de datos reales, el incremento de dicha aportación proporcionado por REE [96] entre los años 2013 y 2014 ha sido utilizado como incremento anual en el cálculo llevado a cabo para los años posteriores (ver Tabla 1.23.).

Tabla 1.22. Factor de emisión de CO₂ estimados para el consumo eléctrico en Baleares en el subperiodo 2012-2030.

Año	Factor de conversión de energía eléctrica final a emisiones de CO₂
	(kgCO ₂ /kWh e.f.)
2012	0,9001
2013	0,7965
2014	0,8058
2015	0,7984
2016	0,7909
2017	0,7833
2018	0,7755
2019	0,7676
2020	0,7595
2021	0,7513
2022	0,7429
2023	0,7344
2024	0,7258
2025	0,7170
2026	0,7081
2027	0,6207
2028	0,6927
2029	0,6834
2030	0,6740

Tabla 1.23. Cuota de participación en la cobertura de la demanda en Baleares. Valores estimados a partir del año 2015.

Año	Sistema eléctrico balear	Enlace Península-Baleares
	(%)	(%)
2012 ^(*)	90,20	9,80
2013 ^(*)	77,63	22,37

2014 ^(*)	76,76	23,24
2015	75,88	24,12
2016	75,01	24,99
2017	74,13	25,87
2018	73,26	26,74
2019	72,38	27,62
2020	71,51	28,49
2021	70,63	29,37
2022	69,75	30,25
2023	68,88	31,12
2024	68,00	32,00
2025	67,13	32,87
2026	66,25	33,75
2027	65,38	34,62
2028	64,50	35,50
2029	63,62	36,38
2030	62,75	37,25

(Fuente: (*) REE [96]; cálculos propios).

3.2. Cálculo de las emisiones de CO₂ en la fase operacional de los hoteles analizados

En base al escenario de variación del consumo energético propuesto con anterioridad y de los factores de emisión de CO₂ estimados para el periodo considerado, se ha procedido al cálculo de las emisiones de CO₂ derivadas de la fase operacional de los hoteles 1 y 2. El valor total de emisiones de CO₂ obtenido para el hotel 1 ha sido de 3168,95 kgCO₂/m², mientras que para el hotel 2 el valor obtenido ha sido de 5033,71 kgCO₂/m². En la Figura 1.10. se muestran las emisiones de CO₂ obtenidas por m² de superficie construida para los dos hoteles (ver Tablas AI.1 y AI.2 Anexo I).

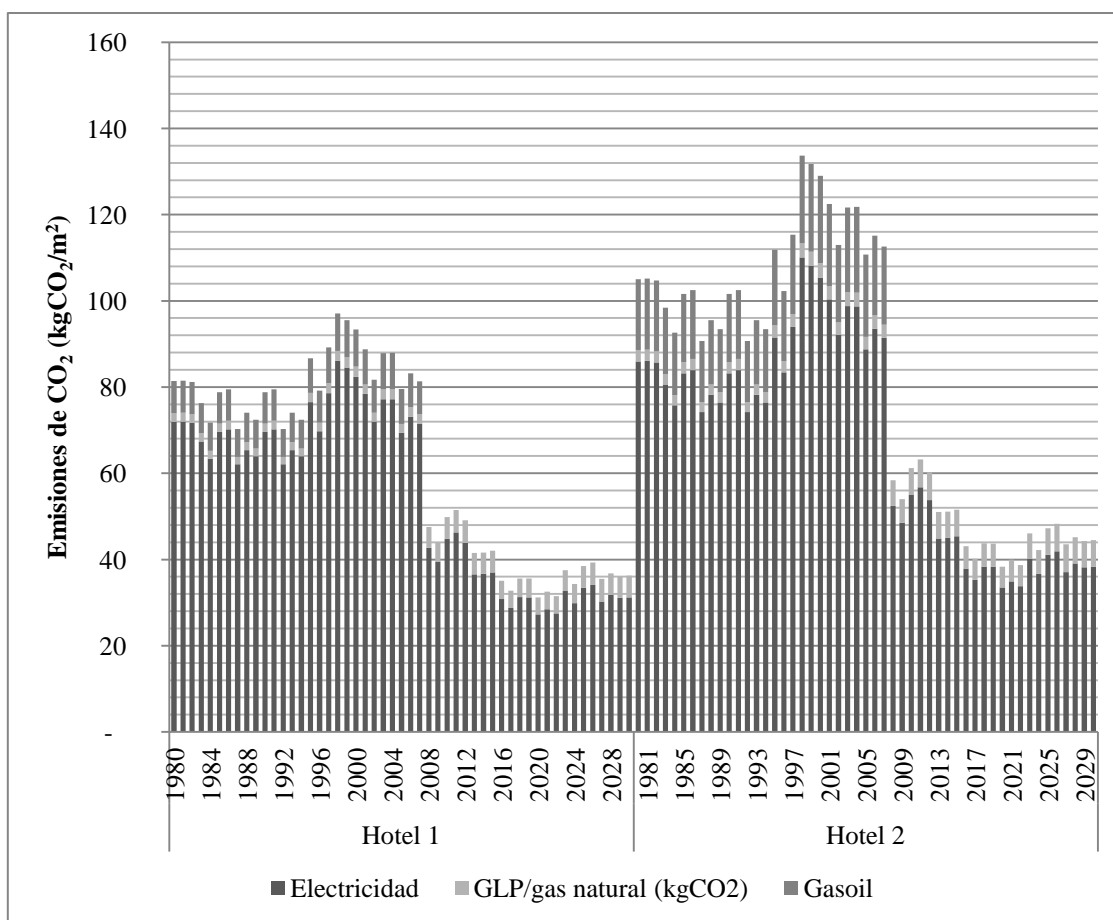


Figura 1.10. Emisiones de CO₂ durante la fase operacional de los hoteles 1 y 2.

Análisis de la fase de reformas

A partir de proyectos de reformas obtenidas de los hoteles analizados, se ha llevado a cabo el estudio de las emisiones de CO₂ asociadas a una serie de reformas básicas: reforma de baños e instalación de lampistería, reforma de las cocinas, cambio de la instalación de aire acondicionado, renovación de la pintura de todos los paramentos, reducción de las habitaciones y reformas de adaptación a las normativas. En estas últimas se han tenido en cuenta la reforma de adaptación de baños para personas con minusvalía y las instalaciones contraincendios. En primer lugar, se ha obtenido un indicador de las emisiones de CO₂ en función del m² reformado. En el caso del cambio de instalación de aire acondicionado y la renovación de la pintura de los paramentos se han obtenido los indicadores en función del m² construido de hotel (ver Tabla 1.24.).

Tabla 1.24. Masa de los materiales y emisiones de CO₂ asociadas a las reformas básicas analizadas en función del m² reformado.

Reformas	Materiales (kg/m ²)	Emisiones de CO ₂ (kgCO ₂ /m ²)
Baños	211,34	457,1

Cocina	802,18	219,7
Sustitución instalación climatización (*)	5,98	27,18
Pintura (*)	17,6	92,15
Reducción habitaciones	237,45	77,27
Adaptación normativas	Baños	154,34
	Contraincendios	3,41

(*) por m² de superficie construida. (Fuente: [79]; elaboración propia).

Para llevar a cabo el balance global se ha llevado a cabo la transformación de los indicadores obtenidos en función del m² construido. Además se ha establecido una frecuencia media para cada una de las reformas consideradas. Se ha considerado que, para un tiempo de vida de 50 años, la reforma de baños y cocinas se realizará un mínimo de dos veces, la sustitución o modificación de la instalación de aire acondicionado se realizará como mínimo una vez, la renovación de la pintura de los paramentos se llevará a cabo al menos cada diez años, la reforma de reducción de habitaciones, que no siempre es habitual en los hoteles, así como las reformas de adaptación a la normativa se ha considerado que se realizarán como mínimo una vez.

Análisis de la fase de demolición

El valor para las emisiones de CO₂ obtenido ha sido de 59,33 kgCO₂/m² en el caso del hotel 1, de 67,31 kgCO₂/m² en el caso del hotel 2 y de 51,26 kgCO₂/m² en el caso del hotel 3. Se ha de tener en cuenta que no se está teniendo en cuenta el tratamiento posterior de los residuos generados ni por tanto las emisiones de CO₂ derivadas del mismo.

Balance global del ciclo de vida

En la Tabla 1.25. se muestran los valores totales de emisiones de CO₂ obtenidos para los hoteles 1 y 2 en las cuatro fases consideradas en su ciclo de vida. El balance global de la participación de cada una de las fases consideradas en el ciclo de vida se muestra en la Figura 1.11.

Tabla 1.25. Emisiones de CO₂ obtenidas para las cuatro fases del ciclo de vida de los hoteles 1 y 2.

		Emisiones de CO₂
		(kgCO₂/m²)
Hotel 1	Fase de construcción	601,40
	Fase operacional	3168,95
	Fase de reformas	133,80
	Fase de demolición	59,30
Hotel 2	Fase de construcción	544,50
	Fase operacional	5033,71
	Fase de reformas	127,20
	Fase de demolición	67,30

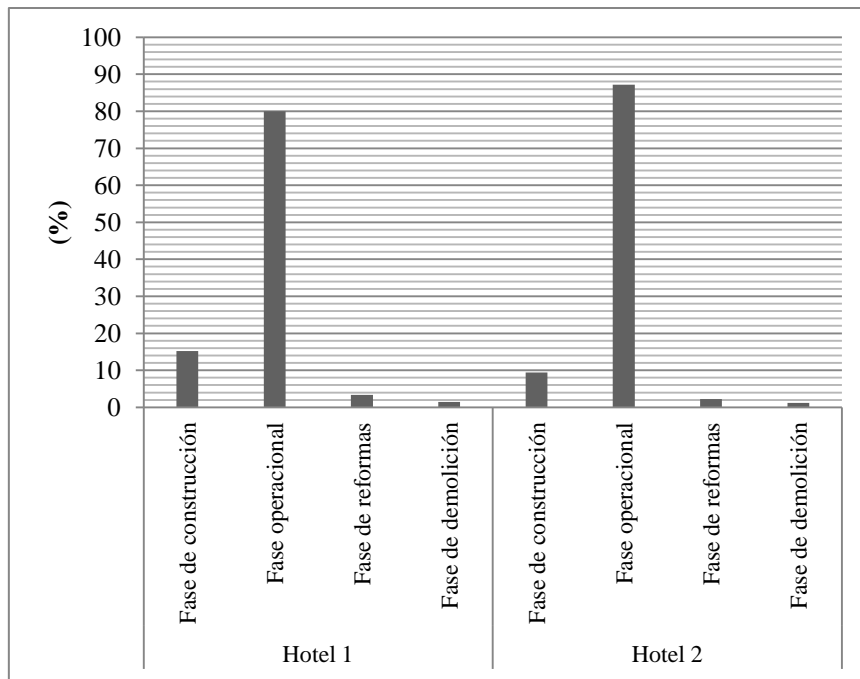


Figura 1.11. Balance global a lo largo del ciclo de vida de las emisiones de CO₂ de los hoteles 1 y 2.

Como se puede observar en la Figura 1.11. la fase operacional es la que presenta el mayor valor de emisiones de CO₂ a lo largo del ciclo de vida de los hoteles 1 y 2. Este valor es mayor en el caso del hotel 2 ya que, como ya se comentó con anterioridad, este hotel permanece abierto anualmente 3 meses más que el hotel 1. Se ha observado que las emisiones de CO₂ de la fase operacional son 5,27 veces superiores a las de la fase de construcción en el caso del hotel 1 y 9,24 veces superiores en el hotel 2. Las fases de reformas presentan participaciones inferiores al 3,5% de las emisiones de CO₂ totales de los dos hoteles a lo largo de su ciclo de vida.

Capítulo 2. Análisis de medidas de reducción de la energía cautiva inicial y sus emisiones de CO₂ asociadas en un edificio educativo de grandes dimensiones situado en las Islas Baleares.

Objetivos

El estudio que se presenta en este capítulo presenta los siguientes objetivos:

- En primer lugar, obtener la energía cautiva inicial (IEE de aquí en adelante, por sus siglas en inglés) y sus emisiones de CO₂ asociadas (IECO₂, en adelante) en la fase de construcción de un edificio educativo de grandes dimensiones situado en las Islas Baleares.
- En segundo lugar y a partir de los resultados obtenidos, analizar medidas de reducción de los valores de IEE y de IECO₂ del edificio mediante la propuesta de sistemas constructivos alternativos.
- En tercer lugar, llevar a cabo una propuesta de escenarios y un análisis económico para determinar en qué casos se producen las mayores reducciones de los valores de IEE y de IECO₂ asociados al edificio.

Metodología

En la primera parte del estudio, se han obtenido los valores de IEE y de IECO₂ asociados a la fase de construcción de un edificio educativo de grandes dimensiones situado en las Islas Baleares (descrito con más detalle en el apartado “Caso de estudio”). Para ello se han utilizado las herramientas TCQ2000 y TCQGMA, así como la base de datos BEDEC PR/PCT [80] del Instituto de la Construcción de Cataluña (ITeC) [79], igual que ya se hizo en el Capítulo 1. Sin embargo, en este caso los resultados se han mostrado en función de las unidades de obra incluídas en el proyecto de construcción y no en función de los materiales básicos. Además, con el objetivo de facilitar la observación de los resultados, dichas unidades de obra se han clasificado en los siguientes grupos o capítulos: cimentaciones, estructura, fachadas, cubiertas, pavimentos, particiones interiores verticales y, por último, puertas y ventanas. Este análisis ha permitido observar la contribución que los diferentes sistemas constructivos tienen sobre los valores de IEE y de IECO₂ del edificio.

A partir de los resultados obtenidos en la primera parte del análisis, se ha hecho una propuesta de sistemas constructivos y elementos alternativos para el edificio, se han analizado sus valores de IEE y de IECO₂ y se han comparado con los del edificio original. En la última parte del estudio, se ha hecho una propuesta de escenarios para

evaluar las reducciones potenciales que se podrían obtener en los valores totales de la IEE y de las IECO₂ del edificio en cada uno de ellos. La evaluación se ha completado con un análisis económico en el que se ha estimado la variación del presupuesto. Los resultados mostrados en este capítulo fueron publicados en la revista *Journal of Building Physics* [103].

Los resultados del estudio se han presentado en función del m² de superficie útil, por considerar esta superficie más representativa del edificio analizado que la superficie construida. En la última parte del estudio, las emisiones de CO₂ se han presentado en tCO₂ porque se han querido resaltar las reducciones totales obtenidas en el edificio con las medidas propuestas.

Caso de estudio

El edificio analizado en este capítulo es un edificio educativo situado en las Islas Baleares. Se trata de un edificio de grandes dimensiones que tiene tres plantas, un sótano para la ubicación de las instalaciones y dos altillos a nivel de cubierta. La superficie útil supera los 18 300 m². El edificio alberga: aulas, despachos, laboratorios, una biblioteca y una cafetería. La estructura del edificio está formada por pórticos de hormigón armado, con distintos tipos de forjados de hormigón: unidireccionales de vigueta y bovedilla, reticulares y de placa alveolar con capa de compresión. Además, tiene una cubierta formada por vigas de acero y chapa de acero grecada con una capa de hormigón. Algunos de los pilares, escaleras, y gradas del edificio están realizados con estructura metálica de acero. Casi todo el pavimento interior es de terrazo, dada su contrastada durabilidad en los edificios públicos existentes. La carpintería exterior es de aluminio anodizado. Predomina la tabiquería de bloque de hormigón vibrado, sobre la cerámica, y el resto de materiales de obra son convencionales. Por cuestiones de confidencialidad no se han incluido fotos o planos del edificio analizado y no se ha proporcionado el nombre del mismo.

Límites del estudio

En este capítulo, el análisis se ha centrado en la energía cautiva inicial (IEE) procedente de los materiales de construcción del edificio. No se han incluido, por tanto, los procesos de construcción in situ del edificio que se sitúan entre el 1% y el 5% de la energía cautiva total en la fase de construcción [88]. Tampoco se han incluido los materiales asociados a las instalaciones, los ascensores y la pintura, que mostraron tener también una baja participación y que no van a ser objeto de modificaciones en este estudio.

Resultados

Energía cautiva inicial (IEE) y emisiones de CO₂ asociadas (IECO₂)

En la fase de construcción, se ha llevado a cabo un análisis de la IEE y las IECO₂ asociadas a los diferentes sistemas constructivos y elementos del edificio. El valor obtenido para la IEE ha sido de 1775,75 kWh/m² (1 kWh=3,6 MJ), mientras que el valor obtenido para las IECO₂ ha sido de 695,3 kgCO₂/m². Los resultados para la IEE se muestran en la Figura 2.1., para cada una de las unidades de obra del edificio que han sido clasificadas en función de los diferentes capítulos especificados en el apartado de Metodología. En la Figura 2.1., no se han incluido aquellas unidades de obra asociadas a la excavación debido a que todos los consumos energéticos y las emisiones de CO₂ están asociados a los procesos de construcción del edificio, no incluidos en el análisis. Además, debido a la cantidad de elementos evaluados, no se han podido mostrar los nombres de cada una de las unidades de obra en el gráfico. A partir de los resultados obtenidos se ha observado que la mayor contribución tanto a la IEE como a las IECO₂ ha venido dado por unidades de obra incluidos en el capítulo de estructura y en el de puertas y ventanas. Se ha observado que de las 87 unidades de obra presentes en el estado de mediciones, únicamente 13 de ellas han supuesto el 75% y el 77% de la IEE y las IECO₂ del edificio, respectivamente. En la Figura 2.2., se muestran de una manera más detallada dichas unidades de obra y se ha observado que la participación conjunta de los forjados estructurales y los marcos de aluminio anodizado ha sido del 34% de la IEE total del edificio.

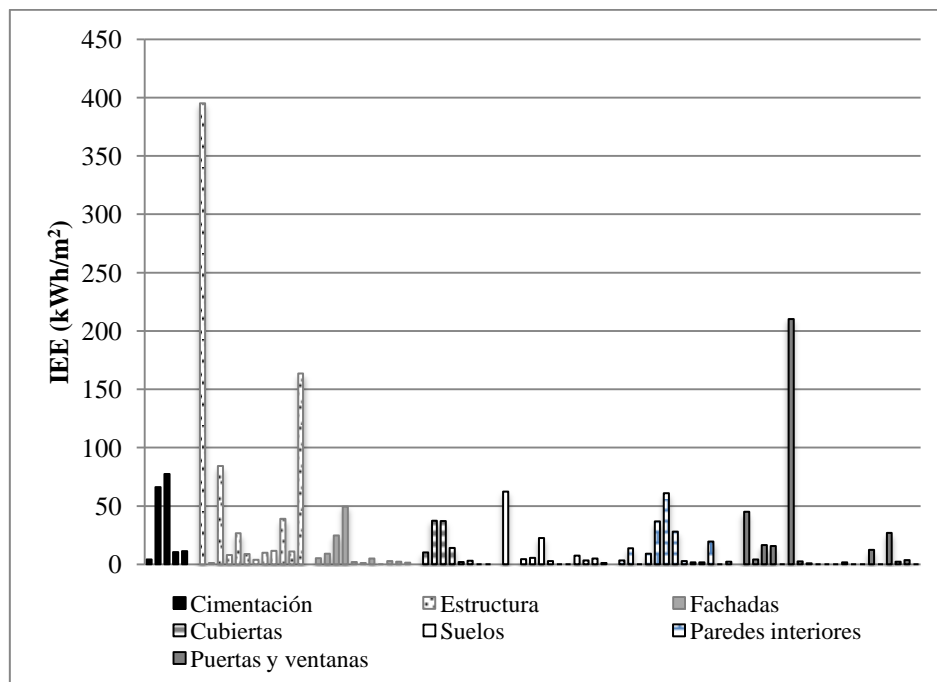


Figura 2.1. IEE de todas las unidades de obra en el caso de estudio analizado.

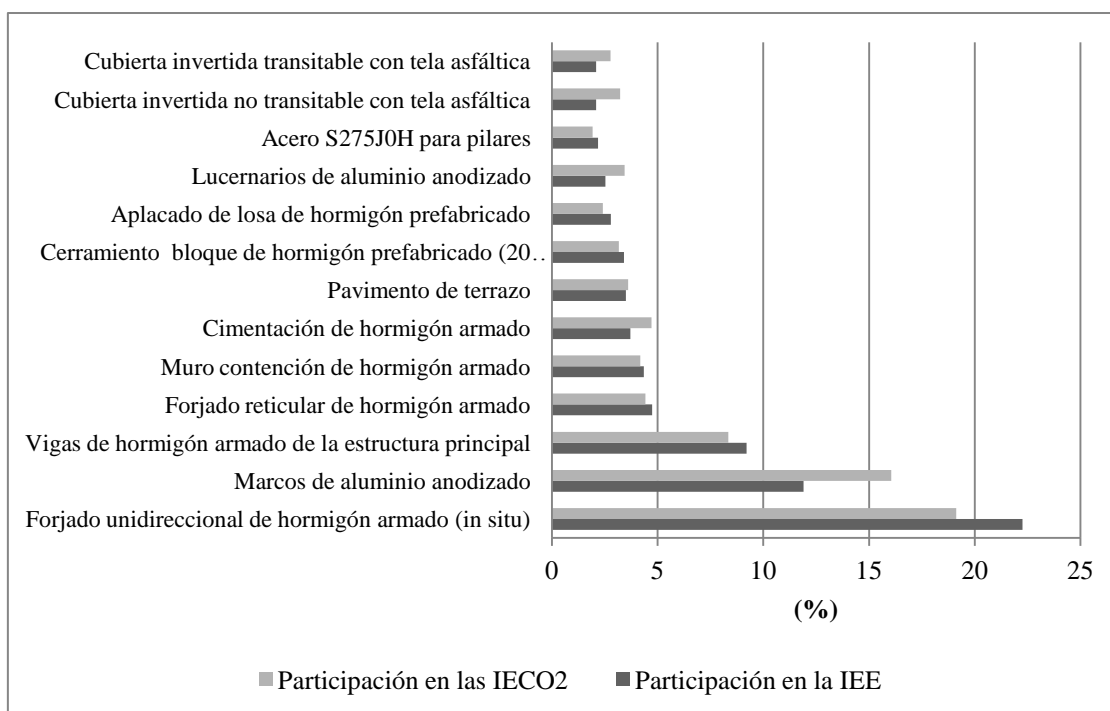


Figura 2.2. Participación en la IEE y las IECo₂ de los 13 sistemas constructivos con una contribución conjunta del 75% a la IEE del edificio.

Alternativas propuestas en el edificio

A partir de los resultados obtenidos en el análisis de la IEE y las IECo₂, se ha llevado a cabo una propuesta de unidades de obra alternativas. Se ha decidido no modificar las características arquitectónicas básicas del edificio, considerando únicamente las modificaciones más simples que permitirían reducciones tanto de la IEE como de las IECo₂ en la fase de diseño del edificio. Ha habido, por tanto, modificaciones que no han sido consideradas para el análisis y la justificación en cada caso se muestra a continuación:

-Cimentaciones: se ha descartado en este caso la modificación tanto de la cimentación de hormigón armado como del muro de contención del edificio por el elevado nivel de estandarización de las soluciones utilizadas.

-Estructura: tal como se ha observado en la Figura 2.1., cuatro unidades de obra relacionadas con la estructura del edificio han mostrado una elevada participación a la IEE y a las IECo₂ del edificio. De ellas, únicamente se ha considerado la modificación de los forjados unidireccionales y las otras tres unidades de obra se han mantenido por considerar que su sustitución habría provocado una modificación sustancial del diseño arquitectónico del edificio.

-Fachadas: no se han propuesto modificaciones en los cerramientos de bloque de hormigón prefabricado a dos caras vistas de 20 cm, por considerar que son necesarias para mantener las condiciones acústicas requeridas y un determinado nivel de resistencia al impacto.

-Carpintería: no se han propuesto modificaciones en los marcos de aluminio anodizado de los lucernarios por cuestiones de durabilidad.

Finalmente, únicamente 6 de las 13 unidades de obra con una mayor contribución a la IEE y a las IECO₂ han sido consideradas para su modificación. Estas unidades de obra se enumeran a continuación: forjados unidireccionales de hormigón armado (in situ), marcos de aluminio anodizado, pavimento de terrazo, aplacado de losa de hormigón prefabricado, cubiertas invertidas transitables y no transitables. Este grupo de sistemas constructivos constituyen el 45% de la IEE y el 47% de las IECO₂ del edificio. En los subapartados que se presentan a continuación se han evaluado las modificaciones propuestas en cada caso, junto con una discusión relativa al efecto que su aplicación en el edificio podría tener sobre el uso de la energía en su fase operacional. En los casos en que ha sido posible, los resultados han sido comparados con aquellos obtenidos por otros autores.

1. Cambios en los forjados estructurales

En el caso de los forjados unidireccionales de hormigón armado se ha propuesto su sustitución por forjados de madera con las mismas propiedades estructurales (ver Figura 2.3.). Se ha observado que los forjados unidireccionales de hormigón armado muestran valores de IEE y de IECO₂ que son 2,7 y 3,3 veces superiores, respectivamente, a los correspondientes a los forjados de madera (ver Figura 2.4.). Estos resultados concuerdan con los hallados por otros autores como, por ejemplo, Mithraratne and Vale [56] que en un análisis llevado a cabo en una vivienda situada en Nueva Zelanda, obtuvieron que la energía cautiva de los forjados de hormigón era 3,4 veces superior a la asociada a los forjados de madera. Li y Altan [104], por su parte, observaron que las estructuras de hormigón armado y de acero requerían 2,36 y 1,9 veces más energía cautiva que las de madera en un análisis llevado a cabo en edificios de Taiwan. Respecto a las emisiones cautivas de CO₂, estos autores observaron que eran 3,1 y 2,2 veces superiores. Börjesson y Gustavsson [105] evaluaron la energía primaria necesaria para la producción de los materiales de construcción en un edificio de pisos y mostraron que ésta era superior al considerar estructuras de hormigón en lugar de estructuras de madera, entre un 60% y un 80%. En este capítulo únicamente se ha analizado la sustitución de los forjados estructurales y se ha observado que los de hormigón armado presentan una IEE un 63,1% superior a la de los forjados de madera.

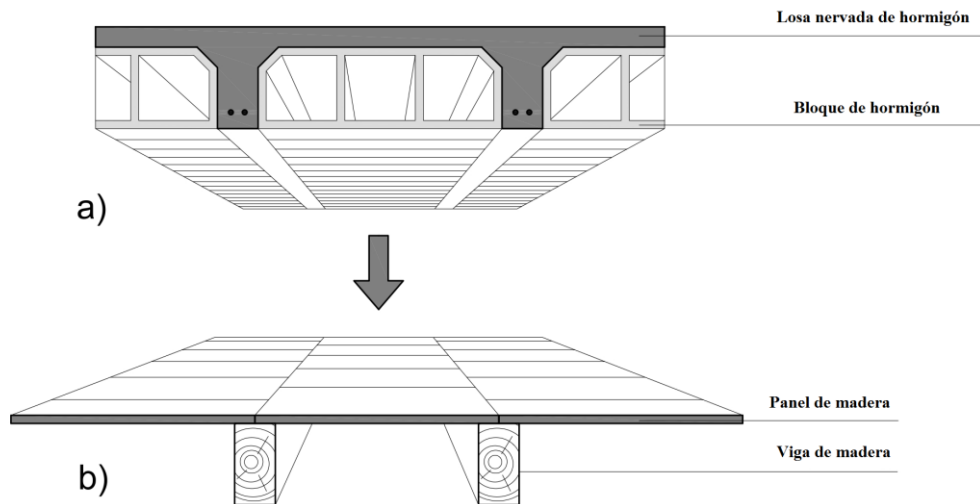


Figura 2.3. Sección de los forjados: (a) en el edificio original; (b) elemento alternativo propuesto.

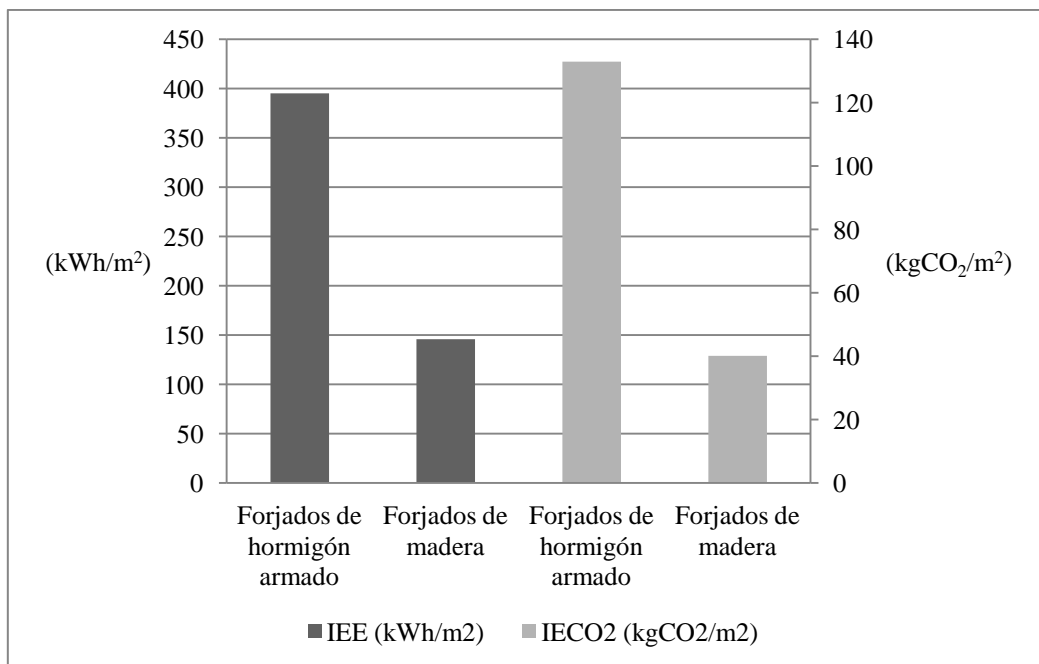


Figura 2.4. IEE y IECO₂ de los forjados estructurales en función del m² de superficie útil del edificio.

1.1. Estructura y energía cautiva

Con el fin de obtener una visión más global del efecto que los materiales utilizados en la estructura tienen sobre la energía cautiva de los edificios, se ha decidido llevar a cabo en este apartado una breve revisión de los resultados hallados por otros autores en diferentes tipologías de edificios. Dado que los límites establecidos en cada estudio, así como las bases de datos utilizadas pueden diferir, el objetivo de este análisis no es el de

establecer comparaciones directas de los resultados obtenidos, sino únicamente el de observar la tendencia general en lo que se refiere a la relación entre la energía cautiva y los materiales utilizados en la estructura. Se han seleccionado para ello un conjunto de estudios que analizan un total de 44 casos y 32 edificios diferentes (ver Tabla 2.1.). En los estudios considerados se ha observado que hay una prevalencia de análisis de edificios de uso residencial frente a otras tipologías.

Tabla 2.1. Revisión de la literatura: energía cautiva y tipo de estructura para diferentes edificios y localizaciones.

Autores	Región	Superficie (m²)	Tipología	Estructura	Energía cautiva (MJ/m²)	Energía cautiva (kWh/m²)
Buchanan y Honey [64]	Nueva Zelanda	94	Vivienda unifamiliar	Estructura de acero/forjados de hormigón	5531,9	1536,64
				Estructura de madera/forjados de hormigón	3957,4	1099,28
				Estructura de madera/forjados de madera	2319,1	644,19
		-	Edificio de oficinas (5 plantas)	Hormigón	5600	1555,56
				Acero	6600	1833,33
				Madera	3700	1027,78
		-	Edificio industrial (1 planta)	Acero	3200	888,89
				Madera	1800	500,00
-	Albergue (6 plantas)	Hormigón	3700	1027,78		
		Madera	2600	722,22		
Suzuki et al. [106]	Japón	5425-10 339	2 bloques de viviendas (12 y 20 plantas)	Hormigón	8000-10 000	2222,23-2777,78
		119-140	4 viviendas unifamiliares	Madera	3000	833,33
		138-155	2 viviendas unifamiliares	Acero	4500	1250,00
Cole y Kernan [32]	Canadá	4620	Edificio de oficinas (3 plantas)	Madera	4540	1261,11
				Hormigón	4790	1330,56
				Acero	5130	1425,00
				Madera	4260	1183,33
				Hormigón	4520	1255,56
				Acero	4860	1350,00
Adalberth [50]	Suecia	130	Viviendas unifamiliares	Madera	3240	900,00
		129		Madera	3132	870,00
		138		Madera	2628	730,00
Suzuki y Oka [107]	Japón	1253-22 982	10 edificios de oficinas	Hormigón/acero	6500-13 000	1805,56-3611,12
Venkatarama Reddy y Jagadish [54]	India	5120	Edificio de 8 plantas	Hormigón	4210	1169,44
		149,5	Edificios de 2 plantas	Mampostería portante	2920	811,11
		160,5			1610	447,22
Scheuer et al. [35]	Michigan	7300	Edificio universitario (6 plantas)	Acero	6986,3	1940,64

Mithraratne y Vale [56]	Nueva Zelanda	94	Vivienda unifamiliar	Madera	4425	1229,17
				Hormigón	4764	1323,33
Huberman y Pearlmutter [108]	Israel	112	Edificio de 2 plantas	Hormigón	5491,1	1525,31

*En esta tabla se han presentado los resultados hallados en MJ/m² por los diferentes autores y la equivalencia en kWh/m², unidades utilizadas en este estudio.

A partir de los estudios mostrados en la Tabla 2.1., se ha decidido separar los resultados hallados para aquellos edificios en que se conoce específicamente su superficie y que además presentan estructuras de madera, de hormigón o de acero. Esto ha dado como resultado una muestra de 21 casos diferentes, en los cuales los valores obtenidos por los diferentes autores para la energía cautiva oscilan entre 500 kWh/m² y 1261,1 kWh/m² en el caso de edificios con estructura de madera, entre 1027,8 kWh/m² y 1555,6 kWh/m² en los que presentan estructura de hormigón y entre 888,9 kWh/m² y 1915,6 kWh/m² para edificios con estructura de acero (ver Figura 2.5.). A partir de estos resultados, se ha observado que los menores valores para la energía cautiva se han obtenido en edificios con estructura de madera y los mayores en edificios con estructura de acero. Sin embargo, hay dispersión en los resultados analizados, lo cual muestra que se hace necesario realizar las comparaciones en un mismo edificio, tal como lo hicieron algunos de los autores de la Tabla 2.1. Buchanan y Honey [47], por ejemplo, evaluaron la modificación de la estructura en varios tipologías de edificios y observaron una reducción del 58% al sustituir el sistema estructural de acero y hormigón por madera en una vivienda unifamiliar. La reducción que obtuvieron estos autores al sustituir la estructura de acero de un edificio industrial por una estructura de madera fue del 44%, y del 30% en la sustitución de la estructura de hormigón en un albergue de 6 plantas. Otros autores, como Cole y Kernan [32] en el análisis de un edificio de oficinas obtuvieron reducciones del 12% al sustituir la estructura de acero por madera. Mithraratne y Vale [56] evaluaron la sustitución de la estructura de hormigón por madera en una vivienda y obtuvieron una reducción de la energía cautiva del 7%. Goverse et al. [109], en un estudio acerca de las oportunidades técnicas del uso de la madera en el sector de la construcción, demostraron que es técnicamente posible llevar a cabo una reducción importante de las emisiones de CO₂ asociadas a los edificios al incrementar el uso de este material en su construcción. Estos autores obtuvieron reducciones del 50% en las emisiones de CO₂ llevando a cabo esta evaluación en cuatro tipologías de viviendas.

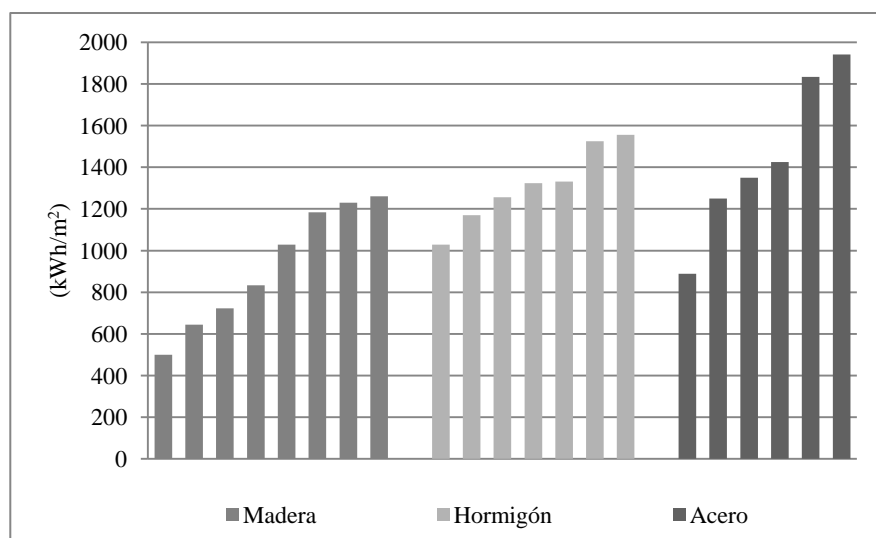


Figura 2.5. Energía cautiva y estructura de una muestra de 21 casos de estudio extraídos de la literatura.

(Fuentes: [32], [35], [47], [54], [56], [106], [108])

1.2. Cambios en la estructura y energía operacional

Al llevar a cabo sustituciones de materiales en un edificio, se hace necesario presentar algunas consideraciones acerca del efecto que dichas sustituciones puedan tener sobre la energía operacional del edificio en su fase de utilización. Al haberse considerado la energía operacional fuera de los límites del análisis presentado en este capítulo, este efecto va a ser discutido de manera general a partir de una revisión de la literatura y la observación de los resultados hallados en otros estudios. Ramesh et al. [33] llevaron a cabo un análisis muy completo de revisión de estudios de ACV y evaluaron los resultados obtenidos en 73 casos de estudio diferentes. A partir de los datos aportados por estos autores se han seleccionado los resultados de un total de 20 casos de estudio, en los que se especifica el sistema estructural utilizado en el edificio y en los que se ha considerado un mismo tiempo de vida de 50 años para el mismo. Aunque en los casos analizados se ha observado que los mayores valores de energía operacional se presentan en edificios con estructura de madera, no se ha observado ningún patrón que permita obtener conclusiones generales a partir de los resultados obtenidos en el análisis de edificios diferentes. Además, en la muestra analizada hay muchos más resultados para edificios con estructura de madera que para edificios con estructuras de hormigón o acero, lo cual hace que las comparaciones no sean determinantes. Hay muchos otros aspectos a tener en cuenta, tales como la inercia térmica o los puentes térmicos que influyen de manera relevante los resultados obtenidos para la energía operacional de los edificios. Cada caso debe ser, por tanto, analizado de manera individual. Tal como especifica Adalberth [110], para llevar a cabo comparaciones basadas en el sistema estructural utilizado es necesario establecer los mismos requerimientos energéticos en la fase de utilización. Esta autora [110] observó que la sustitución de la estructura original de madera por una estructura de hormigón en un bloque de viviendas provocaba diferencias inferiores al 1% en el consumo energético a lo largo del ciclo de vida. Mithraratne y Vale [56], por su parte, llevaron a cabo un ACV en una vivienda unifamiliar y observaron diferencias del 5% en el uso energético a lo largo del ciclo de vida al sustituir la estructura de madera por una estructura de hormigón. Pons y Wadel

[111] analizaron el cambio del sistema estructural en edificios escolares en Cataluña y obtuvieron un incremento del 10% en las emisiones de CO₂ a lo largo de su ciclo de vida al utilizar hormigón en lugar de madera en la estructura de los edificios. Se ha observado, por tanto, que los porcentajes de variación son pequeños al considerar el ciclo de vida completo para el edificio y que varían de un edificio a otro.

2. Sustitución de las carpinterías

Los marcos de aluminio anodizado de las ventanas se hallaban entre los elementos que presentaban una mayor contribución a los valores de IEE y de IECO₂ del edificio (ver Figura 2.2.). El gran valor de la energía cautiva asociado al aluminio anodizado, ya mostrado en otros estudios [21, 26], así como la gran superficie de ventanas presente en el edificio son responsables de este resultado. Para su sustitución se han considerado los siguientes tipos de marcos: de aluminio lacado, de PVC, de madera de densidad media-alta (roble) y de madera de densidad media-baja (pino). En la Figura 2.6., se muestran los valores de IEE y de IECO₂ de los cuatro marcos alternativos propuestos frente a los correspondientes a los marcos de aluminio anodizado del edificio original. A partir de estos resultados se ha observado que las diferencias existentes entre los marcos de aluminio anodizado y los de aluminio lacado no superan el 4%, tanto en el valor de la IEE como en el de las IECO₂. Se ha observado además que los marcos de aluminio anodizado presentan un valor de IECO₂ que es el doble del valor asociado a los marcos de PVC. Las reducciones más significativas en los valores de IEE y de IECO₂ de los marcos se han obtenido al comparar los marcos de aluminio anodizado con los marcos de madera. De hecho, se ha observado que la IEE de los marcos de aluminio anodizado es 59,3 y 76,6 veces mayor que la IEE asociada a los marcos de madera de roble y de pino, respectivamente. Buchanan y Honey [47], ya en 1992, obtuvieron que los marcos de aluminio presentaban una energía cautiva 60,4 veces mayor que los marcos de madera.

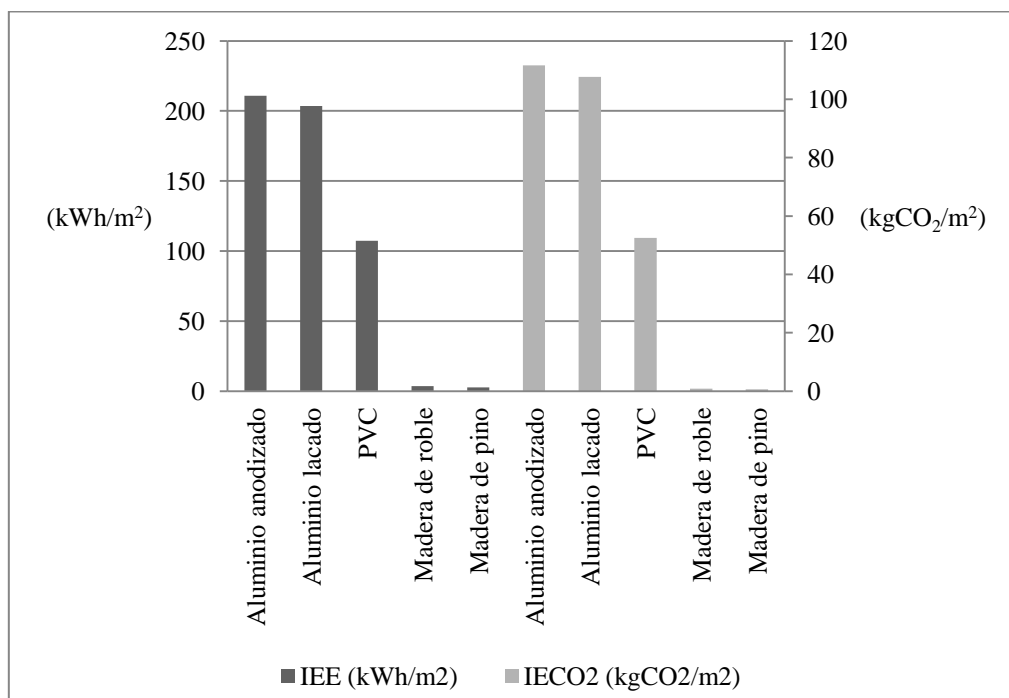


Figura 2.6. Valores de IEE y de IEEO₂ por m² de superficie útil para diferentes marcos de ventana.

(Fuente: [80]; cálculos propios).

2.1. Sustitución de carpinterías y energía operacional

La simulación energética del edificio está fuera de los límites establecidos en este estudio. Por tanto, la discusión acerca del efecto que la sustitución de los marcos podría tener sobre la energía operacional del edificio se ha realizado, de manera muy general, a partir de la comparación de los valores de transmitancia térmica de las ventanas. El vidrio considerado en todos los casos es el ya existente en el edificio original. Se trata de un vidrio doble (6 mm; 4 mm) separado por aire (6 mm) con un valor de transmitancia térmica $U = 3,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ [112]. Los valores de transmitancia térmica de los diferentes tipos de marcos se muestran en la Tabla 2.2. En esta misma tabla se muestra también la transmitancia térmica asociada a las diferentes ventanas, calculada siguiendo la metodología del CTE [16], y su variación con respecto a las ventanas del edificio original. En función de los resultados obtenidos, se ha observado que la transmitancia térmica de las ventanas se ve reducida entre un 18% y un 21% al sustituir los marcos de aluminio anodizado por marcos de PVC o de madera. Los mejores resultados se han obtenido para las ventanas con marcos de PVC. Nikoofard et al. [113] en un análisis llevado a cabo en una vivienda en Canadá observaron que la sustitución de los marcos de aluminio por marcos de madera provocaba reducciones en la energía necesaria para calefacción, durante el tiempo de vida del edificio, entre el 14,7% y el 19%, mientras que en el caso de la refrigeración las modificaciones eran despreciables.

Tabla 2.2. Transmitancia térmica de los marcos y las ventanas, y comparación con los valores asociados a las ventanas del edificio original.

Marcos de las ventanas	U_{marcos} (W/m ² K)	U_{ventanas} (W/m ² K)	Variación de U_{ventanas} (%)
Aluminio (sin rotura de puente térmico)	5,7	3,78	-
PVC (2 cámaras)	2,2	3,08	-18,5
PVC (3 cámaras)	1,8	3	-20,6
Madera de densidad media-alta (roble)	2,2	3,08	-18,5
Madera de densidad media-baja (pino)	2	3,04	-19,6

(Fuente: [112]; cálculos propios)

3. Sustitución de los pavimentos

El edificio original presenta un pavimento de terrazo en prácticamente toda su superficie, que ha mostrado tener una de las mayores participaciones a los valores de IEE y de IE_{CO₂} del edificio (ver Figura 2.2.). Para su sustitución se han propuesto los siguientes pavimentos: gres, gres porcelánico, granito y linóleo. En la Figura 2.7. se muestran los valores de IEE y de IE_{CO₂} de los pavimentos considerados. A la vista de estos valores se ha observado que los pavimentos de gres presentan los mayores valores de IEE. Respecto al pavimento de granito, su IEE presenta un valor 5 veces inferior al valor asociado al terrazo y en el caso del linóleo es 12 veces inferior.

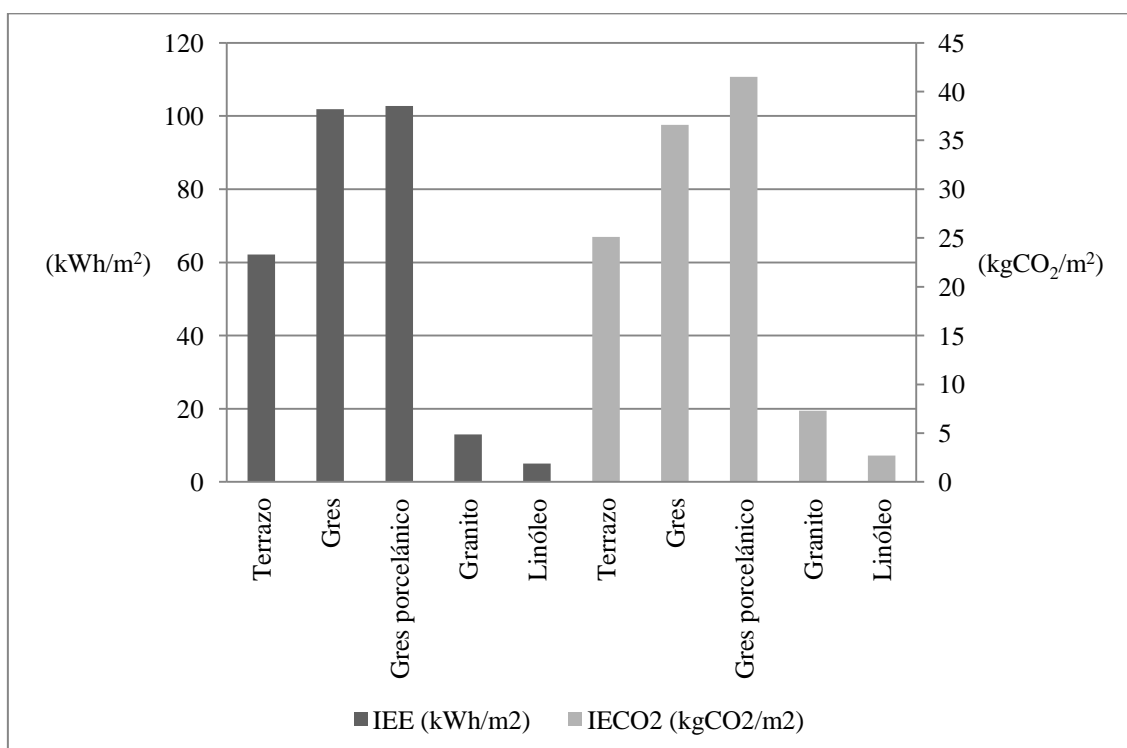


Figura 2.7. Valores de IEE e IE_{CO₂} por m² de superficie útil para 5 tipos de pavimentos.

4. Sustitución propuesta en las fachadas

Se observó en apartados anteriores que uno de los componentes del edificio con una mayor participación a la IEE y a las IECO₂ era el aplacado de losa de hormigón prefabricado de las fachadas (ver Figura 2.2.). En este subapartado, se ha propuesto analizar la sustitución de la fachada con aplacado de losas de hormigón del edificio original por una fachada ventilada con paneles compuestos con chapa de madera natural. Las secciones tanto de la fachada original como de esta fachada alternativa se muestran en la Figura 2.8. En cuanto a los valores de la IEE y de las IECO₂, mostrados en la Figura 2.9., se ha observado que la fachada ventilada presenta valores inferiores, en más de un 50%, a los de la fachada original.

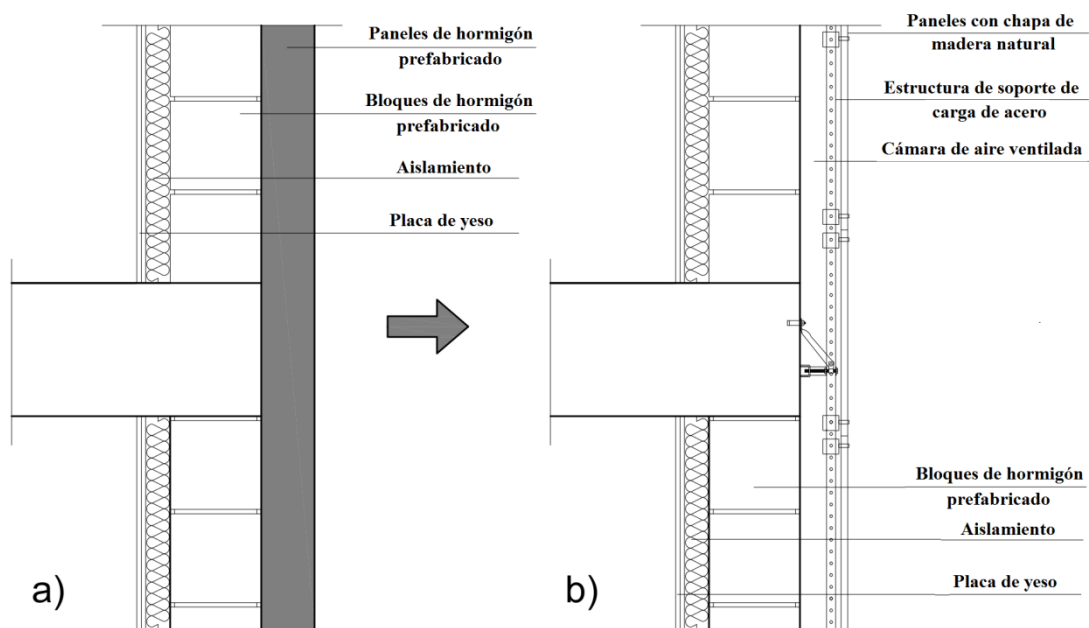


Figura 2.8. Sección de la fachada original del edificio y de la fachada ventilada propuesta.

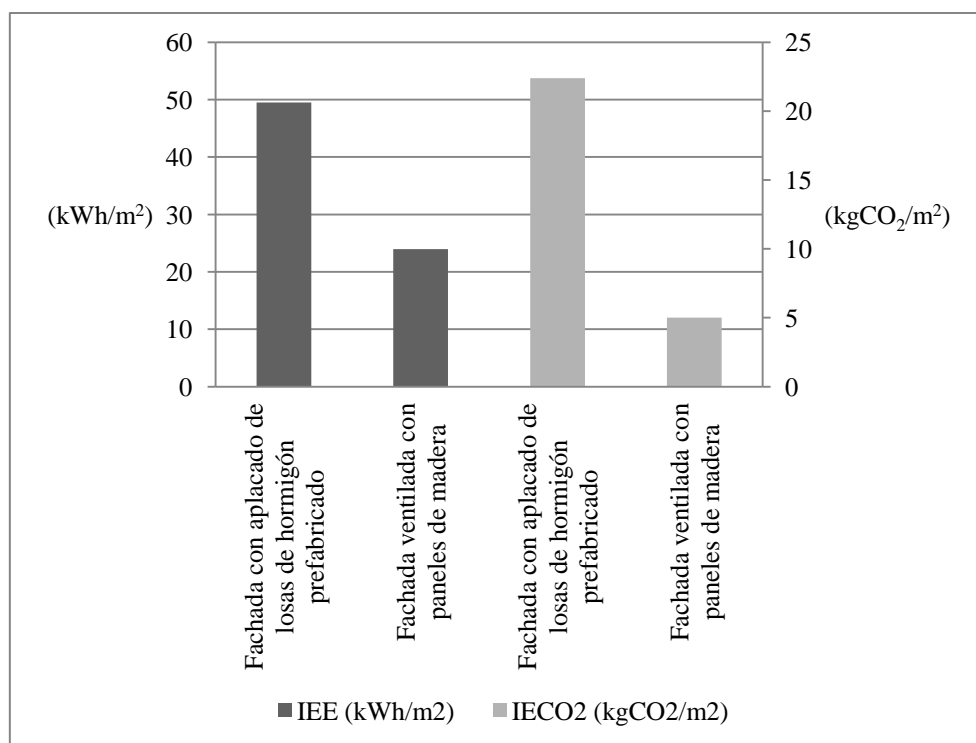


Figura 2.9. Valor de IEE y de IEEO₂ por m² de superficie útil, de la fachada original y la alternativa.

4.1. Sustitución en fachadas y energía operacional

Con respecto al efecto que esta sustitución podría tener sobre la energía operacional del edificio, al no haberse realizado una simulación del mismo, se van a comparar aquí los valores de transmitancia térmica $U(W/m^2K)$ de ambas fachadas. En el caso de la fachada original con losas de hormigón prefabricado el valor de la transmitancia térmica ha sido $U= 0,59 W/m^2K$, mientras que para la fachada ventilada el valor ha sido $U= 0,64 W/m^2K$. Se ha observado, por tanto, que el valor de la transmitancia térmica de la fachada alternativa es superior a la de la fachada original del edificio. Sin embargo, las fachadas ventiladas presentan un mejor comportamiento térmico en lugares con un clima como el de las Islas Baleares. En los meses más cálidos, el sol calienta la capa exterior de la fachada ventilada, lo cual provoca un flujo de aire por convección en el interior de la cámara, efecto que desplaza el aire caliente sustituyéndolo por aire frío. En los meses fríos, el efecto conseguido es menos relevante.

5. Sustitución propuesta en cubiertas

Tal como se observó en la Figura 2.2., tanto las cubiertas planas transitables como las no transitables mostraron un alto nivel de participación a la IEE y a las IEEO₂ del edificio. La única modificación que se ha propuesto, en este caso, ha sido la sustitución de la tela asfáltica por una lámina de PVC. Haciendo esta modificación en las cubiertas planas transitables, se ha observado que la reducción obtenida es del 10% y del 9% para la IEE y las IEEO₂, respectivamente. La reducción de ambos valores se mantiene próxima al 3% en el caso de las cubiertas planas no transitables (ver Figura 2.10.).

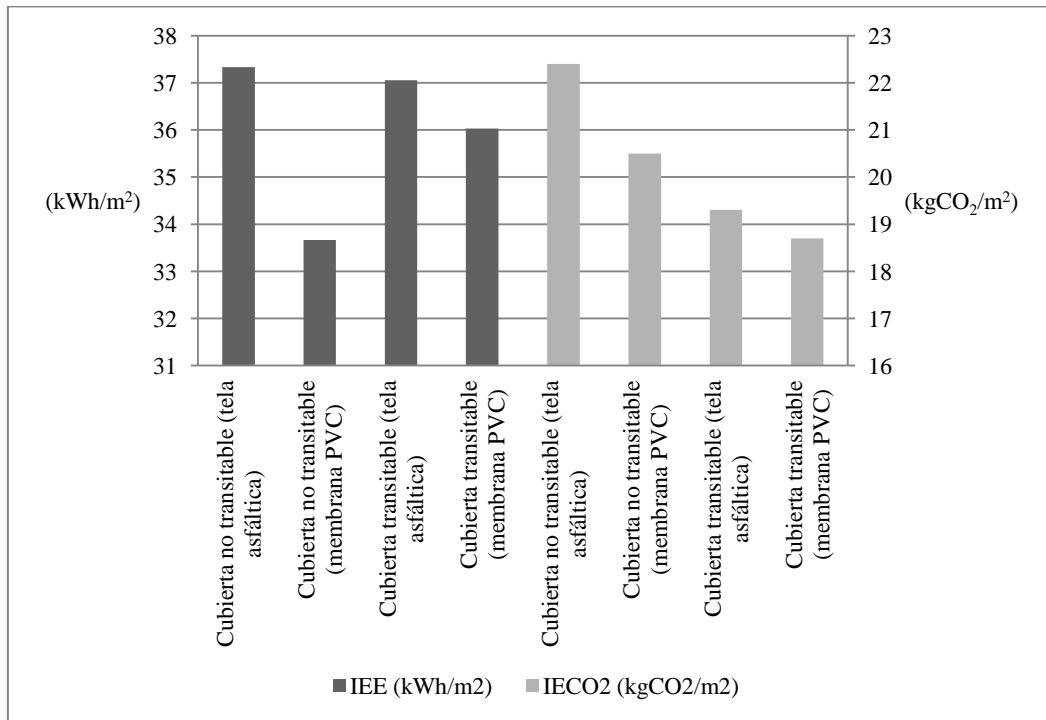


Figura 2.10. Valor de IEE y de IEEO₂ por m² de superficie útil de las cubiertas.

5.1. Modificación en las cubiertas y energía operacional

El valor de la conductividad térmica de la tela asfáltica es $\lambda = 0,23 \text{ W/mK}$ [112], mientras que la conductividad de la membrana de PVC es $\lambda = 0,17 \text{ W/mK}$ [112]. Se observa, por tanto, que la lámina de PVC presenta una conductividad térmica inferior a la correspondiente a la tela asfáltica. En lo que se refiere al efecto que esta modificación de la composición de las cubiertas pudiera tener sobre la energía operacional del edificio, se ha considerado que éste sería despreciable debido al bajo espesor de ambos materiales.

Aplicación en el edificio de las alternativas propuestas

En este apartado se ha evaluado la aplicación en el edificio de las modificaciones propuestas y evaluadas en el apartado anterior. Los resultados se muestran en la Tabla 2.3. y entre ellos se pueden observar los valores de IEE y sus variaciones, así como las variaciones de IEEO₂ y del presupuesto de construcción del edificio. Como ya se indicó en el apartado de Metodología, las variaciones obtenidas en las emisiones de CO₂ se han presentado en este caso en toneladas de CO₂ y no en función de la superficie útil, con el

fin de resaltar la cantidad total de emisiones evitadas con los cambios propuestos en el edificio.

Tabla 2.3. Valores de IEE del edificio junto con sus variaciones, así como las variaciones en los valores de IE_{CO₂} y en el presupuesto aplicando las modificaciones propuestas en el edificio.

	IEE _{total} (kWh/m ²)	Variación de la IEE _{total} (%)	Variación de la IE _{CO₂} total tCO ₂	Variación del presupuesto (%)		
Edificio original	1775,8	--	--	--		
Sustituciones propuestas	Forjados estructurales de madera	1526,5	-14	-1704,4	5,8	
	Aluminio lacado	1768,5	-0,4	-70,7	-0,4	
	Marcos de las ventanas	PVC	1672,3	-5,8	-1085,8	0,2
		Madera de roble	1568,6	-11,7	-2035	1,5
		Madera de pino	1567,8	-11,7	-2037,7	-4,5
	Pavimentos	Gres porcelánico	1816,3	2,3	300,8	1,5
		Gres	1815,4	2,2	211,6	1,6
		Granito	1726,6	-2,8	-327,1	30,2
		Linóleo	1718,6	-3,2	-412,1	0,7
	Fachadas ventiladas	1750,2	-1,4	-216,2	3,6	
	Cubiertas (lámina de PVC)	1771,1	-0,3	-46,6	0,1	

(Fuente: [79], [80]; cálculos propios).

A partir de los resultados mostrados en la Tabla 2.3., se ha observado que todas las modificaciones han provocado reducciones tanto de la IEE como de las IE_{CO₂}, excepto en aquellos casos en que se proponía la sustitución del pavimento de terrazo por pavimentos de gres o gres porcelánico. Respecto a la variación del presupuesto, se ha observado que en 8 de los 11 casos evaluados se han producido incrementos inferiores al 6%. En el caso del granito este incremento ha superado el 30%, y hay 2 casos, como la sustitución de los marcos de las ventanas por marcos de aluminio lacado o de madera de pino en que se han producido reducciones inferiores al 5%. Las reducciones más elevadas de emisiones de CO₂, situadas entre 1080 tCO₂ y 2040 tCO₂, se han observado al sustituir los forjados estructurales de hormigón armado por forjados de madera, y en la sustitución de los marcos de aluminio anodizado de las ventanas por marcos de PVC o marcos de madera de pino o de roble.

Propuesta de escenarios

La combinación de las modificaciones propuestas en apartados anteriores ha dado como resultado un total de 36 escenarios diferentes para evaluar en el edificio. De este grupo de escenarios, se han descartado aquellos que no han proporcionado mejoras significativas con respecto al edificio original, dando como resultado un conjunto de 8 escenarios de mejora. Estos escenarios se muestran en la Tabla 2.4., junto con las

variaciones obtenidas para la IEE y las IE_{CO₂}. En esta tabla las variaciones de la IEE han sido expresadas en kWh por m² de superficie útil, mientras que las variaciones de las IE_{CO₂} han sido expresadas en toneladas de CO₂, igual que ya se hizo en la Tabla 2.3. En la Figura 2.11. se muestran dichas variaciones expresadas, en este caso, en tanto por ciento con respecto a los resultados obtenidos para el edificio original, junto con las variaciones estimadas en el presupuesto.

A partir de los resultados obtenidos, se ha observado que el escenario con una mayor reducción de la IEE y de las IE_{CO₂} han sido aquellos en los que se han sustituido los forjados estructurales de hormigón armado por forjados de madera, junto con la sustitución del pavimento de terrazo por pavimento de linóleo y la sustitución de los marcos de aluminio anodizado de las ventanas por marcos de madera de roble o de pino. En estos escenarios la reducción de emisiones supera las 4000 tCO₂, con una reducción de la IEE próxima al 29% y un incremento del presupuesto del 2% ó el 8%, en función de la madera utilizada en los marcos de las ventanas, de pino o de roble respectivamente. El escenario 1, en el cual se han modificado los forjados estructurales y se han sustituido los marcos de las ventanas por marcos de aluminio lacado es el que ha mostrado las menores reducciones, con un incremento del presupuesto superior al 5%. El Escenario 4 ha mostrado el menor incremento del presupuesto, en torno al 1% con una reducción de emisiones superior a 3700 tCO₂ y una reducción de la IEE del 26%.

Tabla 2.4. Escenarios de mejora propuestos junto con las variaciones de la IEE y las IE_{CO₂}.

Escenarios	Características del edificio			Variación de la IEE _{total}	Variación de la IE _{CO₂} _{total}	Variación del presupuesto
	Forjados estructurales	Pavimento	Marcos de las ventanas	(kWh/m ²)	(tCO ₂)	(%)
Esc. 1			Aluminio lacado	-256,6	-1775	5,4
Esc. 2		Terrazo	PVC	-352,7	-2790	6
Esc. 3			Madera de roble	-456,5	-3739	7,3
Esc. 4	Madera		Madera de pino	-457,3	-3742	1,3
Esc. 5			Aluminio lacado	-313,7	-2187	6,1
Esc. 6		Linóleo	PVC	-409,9	-3202	6,7
Esc. 7			Madera de roble	-513,6	-4151	7,9
Esc. 8			Madera de pino	-514,4	-4154	2

Abreviaturas utilizadas: Esc.: Escenario.

(Fuente: [79], [80]; cálculos propios).

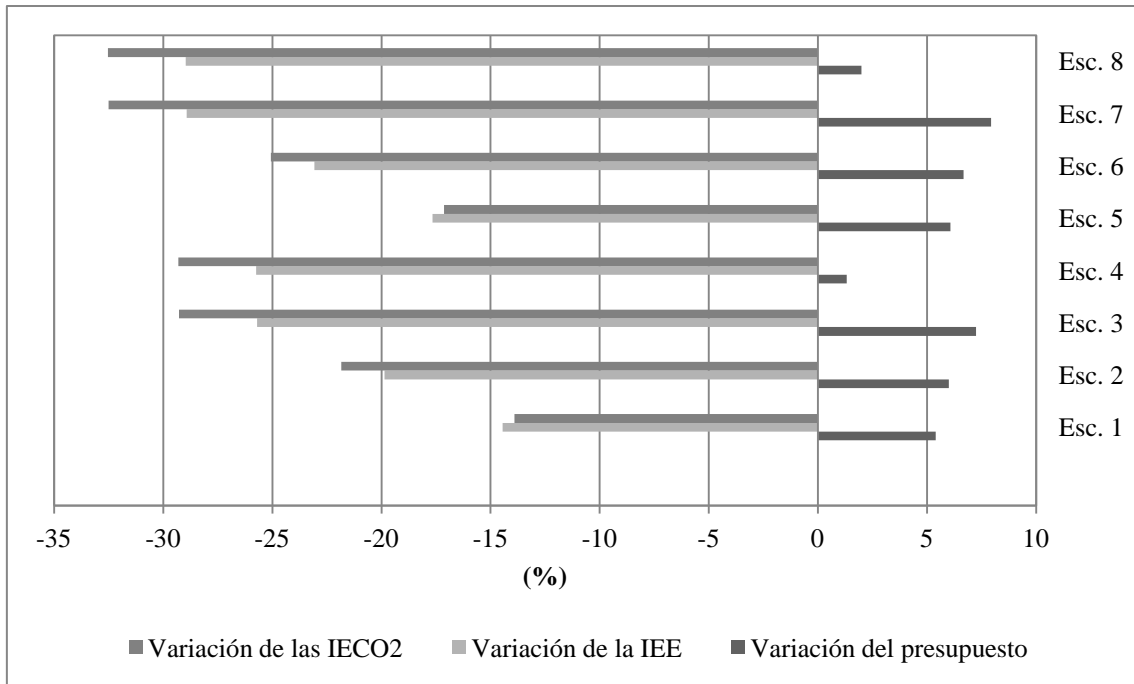


Figura 2.11. Variación de la IEE, las IECO2 y el presupuesto con respecto al edificio original.

Abreviaturas utilizadas: Esc.: Escenario.

(Fuente: [79], [80]; cálculos propios).

Capítulo 3. Análisis de la relación entre la demanda energética y la energía cautiva en edificios residenciales situados en las Islas Baleares

Objetivos

El objetivo principal de este capítulo es hallar la relación entre la demanda energética y la energía cautiva inicial (en adelante, IEE) en edificios de uso residencial en clima mediterráneo.

Metodología

Desarrollo general

El desarrollo del análisis de este capítulo se basa en el proyecto de una vivienda unifamiliar aislada diseñada para las Islas Baleares. Esta vivienda, definida con mayor detalle en secciones posteriores, constituye el caso de estudio inicial. En la primera parte del análisis se han propuesto una serie de modificaciones en dicha vivienda relacionadas con la composición de las fachadas, las cubiertas y las ventanas. Además, se ha propuesto su conversión a otras dos tipologías de vivienda: entre medianeras y en bloque (dúplex). La diferencia entre las tres tipologías seleccionadas para el análisis se halla fundamentalmente en la superficie de intercambio de calor con el medio exterior. Los cerramientos que conforman los modelos de cada una de las tipologías son, en la medida de lo posible, comunes a todas ellas. Las diferencias que pueda haber se especificarán en cada caso concreto. De manera general, todos los cerramientos considerados para el estudio están basados en el Catálogo de Elementos Constructivos del CTE [112]. Este catálogo incluye información acerca de los materiales, especificidades de los sistemas constructivos y sus propiedades acústicas e higrotérmicas [112]. El cálculo de los valores de transmitancia térmica asociada a los distintos cerramientos se ha llevado a cabo a partir de la metodología especificada en el Documento de Apoyo al CTE de Cálculo de parámetros característicos de la envolvente (DA DB-HE/1, en adelante) [114]. Las propiedades térmicas de los materiales se han tomado del Catálogo de Elementos Constructivos del CTE [112] y de la base de datos de la herramienta de simulación utilizada para la obtención de la demanda energética, la Herramienta Unificada LIDER-CALENER [81].

Para el análisis de la demanda energética de calefacción y refrigeración se ha utilizado la Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HU, en adelante) proporcionada por el Ministerio de Fomento como una de las herramientas oficiales para llevar a cabo la

certificación energética en España [81]. Tal como su nombre indica, esta herramienta informática surgió de la unificación en una misma plataforma de las dos herramientas (LIDER y CALENER) ya utilizadas con anterioridad en España. De éstas, la utilizada para el estudio, ha sido concretamente la aplicación LIDER [83], que permite la comprobación del límite de demanda energética establecido en el Documento Básico HE1 del CTE (DB-HE1, en adelante) [82] y que fue validada mediante BESTEST por la Agencia Internacional de la Energía [115]. En el análisis se ha tenido en cuenta el efecto que la rotura del puente térmico en los frentes de forjado y en los pilares tendría sobre la demanda energética. Teniendo en cuenta las modificaciones de los elementos constructivos propuestas, el cambio de la tipología del edificio y la solución de los puentes térmicos se han analizado en este estudio un total de 92 subescenarios.

Posteriormente, se ha llevado a cabo un análisis de las variaciones producidas en la energía cautiva inicial (IEE, por sus siglas en inglés) del edificio analizado en cada uno de los subescenarios propuestos. Para ello, se ha utilizado la base de datos BEDEC del Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña (ITeC) [80]. La IEE se describe como la energía utilizada para construir un edificio [32]. Incluye, por tanto, el proceso de extracción de las materias primas, los procesos de fabricación y su instalación en la construcción de un edificio, teniendo en cuenta los transportes intermedios. En el estudio que se presenta a continuación la IEE no incluye los procesos de instalación en el edificio ni el transporte de los materiales desde la fábrica hasta el lugar de consumo. Sin embargo, el error producido se considera poco relevante, ya que estos procesos suponen únicamente entre el 1% y el 5% de la IEE [88]. Los cambios en los materiales de construcción utilizados suponen modificaciones en el valor de la IEE del edificio. Estas modificaciones se han analizado para cada uno de los subescenarios y se ha llevado a cabo su comparación con el consumo energético de calefacción y refrigeración que tendría el edificio durante un tiempo de vida de 50 años. Este consumo energético se ha estimado a partir de los valores de demanda energética y el rendimiento de tres sistemas de climatización propuestos para el estudio. Este último análisis se ha llevado a cabo con el objetivo de observar la magnitud de las variaciones de la IEE a lo largo del ciclo de vida de las viviendas analizadas. Todos los resultados de este estudio se han presentado por m^2 de superficie útil. El desarrollo y los resultados de este capítulo fueron publicados en la revista *Energy and Buildings* [116].

Caso de estudio inicial

El proyecto de una vivienda unifamiliar aislada diseñada para las Islas Baleares (zona climática B3 según el CTE [16]) ha sido utilizado como caso de estudio inicial. Se trata de una vivienda de dos plantas con una superficie útil de $134,6 m^2$. En la planta baja se dispone de la zona de día, mientras que en la planta superior se disponen las habitaciones y los servicios de las mismas. Las escaleras y distribuidores se disponen en el eje central de la vivienda. Estructuralmente hablando, presenta una disposición de muros de carga y una solución de placas alveolares en los forjados. Los planos de planta de la vivienda se muestran en la Figura 3.1.

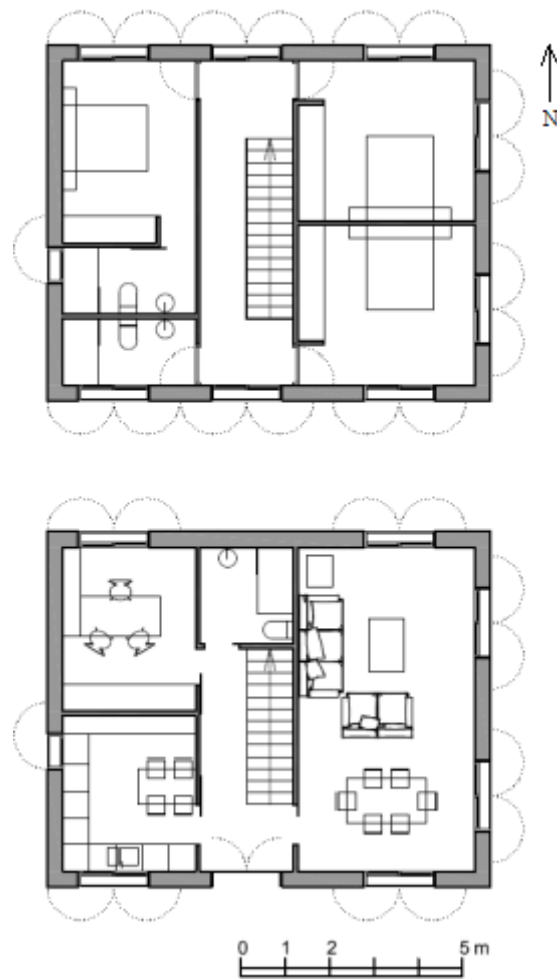


Figura 3.1. Planos de planta del caso de estudio inicial.

Las fachadas de la vivienda son de doble hoja con un aislamiento intermedio de lana de roca. Su composición por capas, así como las propiedades térmicas de los materiales que las componen se muestran en la Tabla 3.1. El límite establecido para este tipo de cerramientos en el DB-HE1 [114] es de 1 W/m²K, en la zona climática de invierno B.

Tabla 3.1. Composición de la fachada F₀ en el caso de estudio inicial.

Fachada F ₀	Espesor	Conductividad	Densidad	Resistencia térmica
Materiales	(m)	(W/mK)	(kg/m ³)	R _i (m ² K/W)
Mortero de cemento	0,015	1,8	2100	0,008
BH perforado áridos ligeros	0,24	0,289	850	0,830
Lana mineral (MW)	0,12	0,04	40	2,941
Tabicón de LH doble	0,075	0,469	930	0,160
Enlucido de yeso	0,015	0,57	1150	0,026
Resistencia térmica por conducción		$R(m^2K/W)=\sum R_i$		3,97
Resistencia térmica superficial interior		$R_{si}(m^2K/W)=1/h_i$		0,13

Resistencia térmica superficial exterior	$R_{se} (m^2K/W) = 1/h_e$	0,04
Resistencia térmica total	$R_T (m^2K/W) = R_{si} + R + R_{se}$	4,14
Transmitancia térmica	$U (W/m^2K) = 1/R_T$	0,24

(Fuente:[81], [112], [114]).

La composición del suelo en contacto con el terreno se muestra en la Tabla 3.2. Su transmitancia térmica se ha obtenido siguiendo la metodología establecida en el DA DB-HE/1 [114] por interpolación lineal a partir de valores tabulados en dicho documento y en función de una serie de parámetros: la resistencia térmica del aislante térmico, $R_a (m^2K/W)$; el ancho D de la banda de aislamiento; y el parámetro B', conocido como longitud característica. En el caso considerado, al tratarse de un suelo apoyado sobre el terreno con un aislamiento térmico continuo de lana mineral de 8 cm, el valor de R_a es de $2 m^2K/W$, la longitud característica B' tiene un valor de 4,1 y el valor obtenido, por tanto, para la transmitancia térmica, U_s , es de $0,51 W/m^2K$. Dicho valor cumple con el límite establecido en el DB-HE1 para este tipo de cerramientos en la zona climática de invierno B.

Tabla 3.2. Composición del suelo en contacto con el terreno en el caso de estudio inicial.

Suelo en contacto con el terreno	Espesor	Conductividad	Densidad	Resistencia térmica
Materiales	(m)	(W/mK)	(kg/m ³)	$R_i (m^2K/W)$
Baldosa cerámica	0,015	1	2000	0,015
Hormigón armado	0,05	2,3	2400	0,022
Lámina geotextil	0,001	0,05	120	0,020
Lana mineral (MW)	0,08	0,04	40	2,000
Lámina geotextil	0,001	0,05	120	0,020
Hormigón armado	0,1	2,3	2400	0,043
Arena y grava	0,1	2	1950	0,050

(Fuente:[81], [112], [114]).

La cubierta en el caso de estudio inicial es una cubierta inclinada a dos aguas sobre tabiquillos conejeros y cámara de aire ligeramente ventilada. Para su correcta definición en la HU se ha considerado, por una parte, la composición del cerramiento inclinado y, por otra, la composición del forjado interior en contacto con el espacio no habitable ligeramente ventilado. La composición de dichos elementos se muestra en las Tablas 3.3. y 3.4. En el caso de las particiones interiores en contacto con espacios no habitables, como es el caso del forjado de la buhardilla, su transmitancia térmica se define en el DB-HE1 como el producto de la transmitancia térmica de la partición interior por el coeficiente de reducción de temperatura debido a la existencia de un espacio no habitable, b, en cuya obtención se deberá tener en cuenta el grado de ventilación de dicho espacio, la situación del aislamiento térmico y la relación de áreas existente entre la partición interior y el cerramiento exterior [114]. En este caso concreto el espacio bajo el cerramiento inclinado está ligeramente ventilado (nivel de estanqueidad 3) y la relación entre las áreas es de 1,05. El valor obtenido para el coeficiente de reducción de temperatura b, siguiendo la metodología establecida en el DA DB/HE1, es de 0,92. El valor obtenido para la transmitancia térmica de la partición

interior se muestra en la Tabla 3.4. El límite establecido en el DB-HE1 [82] para este tipo de particiones interiores en la zona climática de invierno B es de $0,65 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Tabla 3.3. Composición del cerramiento inclinado de cubierta en el caso de estudio inicial.

Cerramiento inclinado	Espesor	Conductividad	Densidad	Resistencia térmica
Materiales	(m)	(W/mK)	(kg/m ³)	R _i (m ² K/W)
Teja de arcilla cocida	0,02	1	2000	0,020
Cámara de aire ligeramente ventilada	0,02	-		0,080
Mortero de cemento	0,015	1,8	2100	0,008
Lámina geotextil	0,001	0,05	120	0,020
Lámina de PVC	0,002	0,17	1390	0,012
Rasilla cerámica	0,04	0,222	670	0,180

(Fuente:[81], [112], [114]).

Tabla 3.4. Composición del forjado interior en contacto con espacio no habitable.

Forjado buhardilla	Espesor	Conductividad	Densidad	Resistencia térmica
Materiales	(m)	(W/mK)	(kg/m ³)	R _i (m ² K/W)
Poliestireno extruido XPS	0,06	0,034	38	1,765
Losa alveolar con capa compresión	0,3	1,579	1530	0,190
Cámara de aire sin ventilar horizontal	0,05	-	-	0,160
Placa yeso laminado	0,015	0,25	825	0,060
Resistencia térmica por conducción		$R(\text{m}^2\text{K/W})=\sum R_i$		2,175
Resistencia térmica superficial interior		$R_{si}(\text{m}^2\text{K/W})=1/h_i$		0,1
Resistencia térmica superficial exterior		$R_{se}(\text{m}^2\text{K/W})=1/h_e$		0,1
Resistencia térmica total		$R_T(\text{m}^2\text{K/W})=R_{si}+R+R_{se}$		2,375
Transmitancia térmica Up		$U_p(\text{W/m}^2\text{K})=1/R_T$		0,42
Transmitancia térmica U		$U(\text{W/m}^2\text{K})=U_p \cdot b$		0,39

(Fuente:[81], [112], [114]).

La composición del resto de particiones interiores se muestra en las Tablas 3.5. y 3.6. La puerta de entrada es de madera de densidad media alta, con una transmitancia térmica de $2,2 \text{ W/m}^2\text{K}$. La composición de las ventanas se muestra en la Tabla 3.7. El valor de su transmitancia térmica se ha calculado haciendo uso de la Ecuación 3-1., siguiendo la metodología establecida en el DA DB-HE/1 [114]. El valor obtenido para la transmitancia térmica de las ventanas es de $2,11 \text{ W/m}^2\text{K}$, valor que se encuentra por

debajo del valor límite establecido para la zona climática de invierno B en el DB-HE1 [82].

Ecuación 3-1. Transmitancia térmica de los huecos.

$$U_H = (1 - FM) \cdot U_{H,v} + FM \cdot U_{H,m}$$

(Fuente: [114])

donde,

FM: es la fracción del hueco ocupada por el marco;

$U_{H,v}$ [W/m²K]: es la transmitancia térmica del vidrio;

$U_{H,m}$ [W/m²K]: es la transmitancia térmica del marco.

Tabla 3.5. Composición del tabique interior en el caso de estudio inicial.

Tabique	Espesor	Conductividad	Densidad	Resistencia térmica
Materiales	(m)	(W/mK)	(kg/m ³)	R _i (m ² K/W)
Enlucido de yeso	0,015	0,57	1150	0,026
Tabicón de ladrillo hueco triple	0,105	0,219	620	0,479
Enlucido de yeso	0,015	0,57	1150	0,026
Resistencia térmica por conducción		R(m ² K/W)=ΣR _i		0,532
Resistencia térmica superficial interior		R _{si} (m ² K/W)=1/h _i		0,13
Resistencia térmica superficial exterior		R _{se} (m ² K/W)=1/h _e		0,13
Resistencia térmica total		R _T (m ² K/W) =R _{si} +R+R _{se}		0,792
Transmitancia térmica		U(W/m ² K) = 1/R _T		1,26

(Fuente:[81], [112], [114]).

Tabla 3.6. Composición del forjado interior entre plantas en el caso de estudio inicial.

Forjado interior	Espesor	Conductividad	Densidad	Resistencia térmica
Materiales	(m)	(W/mK)	(kg/m ³)	R _i (m ² K/W)
Baldosa cerámica	0,015	1	2000	0,015
Mortero de cemento	0,05	1,8	2100	0,028
Losa alveolar con capa compresión	0,3	1,579	1530	0,19
Cámara de aire sin ventilar horizontal	0,05	-	-	0,16
Placa yeso laminado	0,015	0,25	825	0,06

Resistencia térmica por conducción	$R(m^2K/W)=\Sigma R_i$	0,45
Resistencia térmica superficial interior superior	$R_{si}(m^2K/W)=1/h_i$	0,17
Resistencia térmica superficial interior inferior	$R_{si}(m^2K/W)=1/h_i$	0,1
Resistencia térmica total	$R_T(m^2K/W) = R_{si}+R+R_{se}$	0,72
Transmitancia térmica	$U(W/m^2K) = 1/R_T$	1,38

(Fuente:[81], [112], [114]).

Tabla 3.7. Composición de las ventanas en el caso de estudio inicial.

Componentes ventanas V_0	Propiedades	$U(W/m^2K)$
Marco	Madera de densidad media alta	2,2
Vidrio	Doble bajo emisivo 4-6-4 (factor solar, $g=0,6$)	2,1

(Fuente:[81], [112], [114]).

Modificaciones propuestas en el caso de estudio inicial

El análisis mostrado en este capítulo se basa en la evaluación de diferentes escenarios y subescenarios que presentan modificaciones con respecto al caso de estudio inicial. La propuesta de escenarios se va a basar, por tanto, en la sustitución o modificación de elementos constituyentes de la vivienda utilizada como caso de estudio inicial por otros elementos alternativos. Los elementos alternativos elegidos para tal fin se muestran en las Tablas 3.8.-3.19. En total constituyen un conjunto de 9 fachadas, 2 cubiertas y 2 ventanas. A continuación se van a exponer las modificaciones propuestas por grupo de elementos:

-En la elección de las nuevas fachadas se ha tenido en cuenta la sustitución del aislante térmico utilizado, la modificación de la posición de este último, así como la sustitución del bloque de hormigón por ladrillo cerámico de ½ pie.

-En cuanto a las cubiertas, se ha propuesto la modificación de la cubierta inclinada a dos aguas presente en el caso de estudio inicial por dos cubiertas planas, una invertida y una convencional.

-En el caso de las ventanas, la única modificación propuesta en las mismas sólo contempla la sustitución del marco de madera del caso de estudio inicial por otros dos tipos de marco, de PVC y de aluminio lacado. El vidrio posee las mismas características que el utilizado en el caso de estudio inicial en las ventanas V_0 .

En cuanto a la nomenclatura utilizada, el subíndice “0” está asociado a aquellos elementos presentes en el caso de estudio inicial; mientras que el subíndice “LC” hace

referencia a “ladrillo cerámico” en sustitución del bloque de hormigón en la composición de las fachadas.

Tabla 3.8. Composición de la fachada F₁.

Fachada F ₁	Espesor	Conductividad	Densidad	Resistencia térmica
Materiales	(m)	(W/mK)	(kg/m ³)	R _i (m ² K/W)
Mortero de cemento	0,015	1,8	2100	0,008
BH perforado áridos ligeros	0,24	0,289	850	0,830
Poliestireno expandido (EPS)	0,12	0,037	30	3,243
Tabicón de LH doble	0,075	0,469	930	0,160
Enlucido de yeso	0,015	0,57	1150	0,026
Espesor total	0,465			
Resistencia térmica por conducción		$R(\text{m}^2\text{K/W})=\Sigma R_i$		4,268
Resistencia térmica superficial interior		$R_{si}(\text{m}^2\text{K/W})=1/h_i$		0,13
Resistencia térmica superficial exterior		$R_{se}(\text{m}^2\text{K/W})=1/h_e$		0,04
Resistencia térmica total		$R_T(\text{m}^2\text{K/W})=R_{si}+R+R_{se}$		4,438
Transmitancia térmica		$U(\text{W/m}^2\text{K})=1/R_T$		0,23

(Fuente:[81], [112], [114]).

Tabla 3.9. Composición de la fachada F₂.

Fachada F ₂	Espesor	Conductividad	Densidad	Resistencia térmica
Materiales	(m)	(W/mK)	(kg/m ³)	R _i (m ² K/W)
Mortero de cemento	0,015	1,8	2100	0,008
BH perforado áridos ligeros	0,24	0,289	850	0,830
Poliuretano proyectado (PUR)	0,12	0,028	45	4,286
Tabicón de LH doble	0,075	0,469	930	0,160
Enlucido de yeso	0,015	0,57	1150	0,026
Espesor total	0,465			
Resistencia térmica por conducción		$R(\text{m}^2\text{K/W})=\Sigma R_i$		5,311
Resistencia térmica superficial interior		$R_{si}(\text{m}^2\text{K/W})=1/h_i$		0,13
Resistencia térmica superficial exterior		$R_{se}(\text{m}^2\text{K/W})=1/h_e$		0,04
Resistencia térmica total		$R_T(\text{m}^2\text{K/W})=R_{si}+R+R_{se}$		5,481
Transmitancia térmica		$U(\text{W/m}^2\text{K})=1/R_T$		0,18

(Fuente:[81], [112], [114]).

Tabla 3.10. Composición de la fachada F₃.

Fachada F ₃	Esesor	Conductividad	Densidad	Resistencia térmica
Materiales	(m)	(W/mK)	(kg/m ³)	R _i (m ² K/W)
Mortero de cemento	0,015	1,8	2100	0,008
Poliestireno extruido (XPS)	0,12	0,038	38	3,158
BH perforado áridos ligeros	0,24	0,289	850	0,830
Enlucido de yeso	0,015	0,57	1150	0,026
Esesor total	0,39			
Resistencia térmica por conducción		$R(m^2K/W)=\Sigma R_i$		4,023
Resistencia térmica superficial interior		$R_{si}(m^2K/W)=1/h_i$		0,13
Resistencia térmica superficial exterior		$R_{se}(m^2K/W)=1/h_e$		0,04
Resistencia térmica total		$R_T(m^2K/W) = R_{si}+R+R_{se}$		4,193
Transmitancia térmica		$U(W/m^2K) = 1/R_T$		0,24

(Fuente:[81], [112], [114]).

Tabla 3.11. Composición de la fachada F₄.

Fachada F ₄	Esesor	Conductividad	Densidad	Resistencia térmica
Materiales	(m)	(W/mK)	(kg/m ³)	R _i (m ² K/W)
Mortero de cemento	0,015	1,8	2100	0,008
Espuma rígida de poliuretano (PUR)	0,12	0,028	45	4,286
BH perforado áridos ligeros	0,24	0,289	850	0,830
Enlucido de yeso	0,015	0,57	1150	0,026
Esesor total	0,39			
Resistencia térmica por conducción		$R(m^2K/W)=\Sigma R_i$		5,151
Resistencia térmica superficial interior		$R_{si}(m^2K/W)=1/h_i$		0,13
Resistencia térmica superficial exterior		$R_{se}(m^2K/W)=1/h_e$		0,04
Resistencia térmica total		$R_T(m^2K/W) = R_{si}+R+R_{se}$		5,321
Transmitancia térmica		$U(W/m^2K) = 1/R_T$		0,19

(Fuente:[81], [112], [114]).

Tabla 3.12. Composición de la fachada F_{0LC}.

Fachada F _{0LC}	Esesor	Conductividad	Densidad	Resistencia térmica
Materiales	(m)	(W/mK)	(kg/m ³)	R _i (m ² K/W)
Mortero de cemento	0,015	1,8	2100	0,008
Ladrillo macizo cerámico de 1/2 pie	0,123	1,02	2170	0,121
Lana mineral (MW)	0,12	0,04	40	3,000
Tabicón de LH doble	0,075	0,469	930	0,160
Enlucido de yeso	0,015	0,57	1150	0,026

Espesor total	0,348	
Resistencia térmica por conducción	$R(m^2K/W)=\Sigma R_i$	3,315
Resistencia térmica superficial interior	$R_{si}(m^2K/W)=1/h_i$	0,13
Resistencia térmica superficial exterior	$R_{se}(m^2K/W)=1/h_e$	0,04
Resistencia térmica total	$R_T(m^2K/W) = R_{si}+R+R_{se}$	3,485
Transmitancia térmica	$U(W/m^2K) = 1/R_T$	0,29

(Fuente:[81], [112], [114]).

Tabla 3.13. Composición de la fachada F_{ILC}.

Fachada F _{ILC}	Espesor	Conductividad	Densidad	Resistencia térmica
Materiales	(m)	(W/mK)	(kg/m ³)	R _i (m ² K/W)
Mortero de cemento	0,015	1,8	2100	0,008
Ladrillo macizo cerámico de 1/2 pie	0,123	1,02	2170	0,121
Poliestireno expandido (EPS)	0,12	0,037	30	3,243
Tabicón de LH doble	0,075	0,469	930	0,160
Enlucido de yeso	0,015	0,57	1150	0,026
Espesor total	0,348			
Resistencia térmica por conducción		$R(m^2K/W)=\Sigma R_i$		3,558
Resistencia térmica superficial interior		$R_{si}(m^2K/W)=1/h_i$		0,13
Resistencia térmica superficial exterior		$R_{se}(m^2K/W)=1/h_e$		0,04
Resistencia térmica total		$R_T(m^2K/W) = R_{si}+R+R_{se}$		3,728
Transmitancia térmica		$U(W/m^2K) = 1/R_T$		0,27

(Fuente:[81], [112], [114]).

Tabla 3.14. Composición de la fachada F_{2LC}.

Fachada F _{2LC}	Espesor	Conductividad	Densidad	Resistencia térmica
Materiales	(m)	(W/mK)	(kg/m ³)	R _i (m ² K/W)
Mortero de cemento	0,015	1,8	2100	0,008
Ladrillo macizo cerámico de 1/2 pie	0,123	1,02	2170	0,121
Poliuretano proyectado (PUR)	0,12	0,028	45	4,286
Tabicón de LH doble	0,075	0,469	930	0,160
Enlucido de yeso	0,015	0,57	1150	0,026
Espesor total	0,348			
Resistencia térmica por conducción		$R(m^2K/W)=\Sigma R_i$		4,601
Resistencia térmica superficial interior		$R_{si}(m^2K/W)=1/h_i$		0,13
Resistencia térmica superficial exterior		$R_{se}(m^2K/W)=1/h_e$		0,04
Resistencia térmica total		$R_T(m^2K/W) = R_{si}+R+R_{se}$		4,771
Transmitancia térmica		$U(W/m^2K) = 1/R_T$		0,21

(Fuente:[81], [112], [114]).

Tabla 3.15. Composición de la fachada F_{3LC}.

Fachada F _{3LC}	Espesor	Conductividad	Densidad	Resistencia térmica
Materiales	(m)	(W/mK)	(kg/m ³)	R _i (m ² K/W)
Mortero de cemento	0,015	1,8	2100	0,008
Poliestireno extruido (XPS)	0,12	0,038	38	3,158
Ladrillo macizo cerámico de 1/2 pie	0,123	1,02	2170	0,121
Enlucido de yeso	0,015	0,57	1150	0,026
Espesor total	0,273			
Resistencia térmica por conducción		R(m ² K/W)=ΣR _i		3,313
Resistencia térmica superficial interior		R _{si} (m ² K/W)=1/h _i		0,13
Resistencia térmica superficial exterior		R _{se} (m ² K/W)=1/h _e		0,04
Resistencia térmica total		R _T (m ² K/W) =R _{si} +R+R _{se}		3,483
Transmitancia térmica		U(W/m ² K) = 1/R _T		0,29

(Fuente:[81], [112], [114]).

Tabla 3.16. Composición de la fachada F_{4LC}.

Fachada F _{4LC}	Espesor	Conductividad	Densidad	Resistencia térmica
Materiales	(m)	(W/mK)	(kg/m ³)	R _i (m ² K/W)
Mortero de cemento	0,015	1,8	2100	0,008
Espuma rígida de poliuretano (PUR)	0,12	0,028	45	4,286
Ladrillo macizo cerámico de 1/2 pie	0,123	1,02	2170	0,121
Enlucido de yeso	0,015	0,57	1150	0,026
Espesor total	0,273			
Resistencia térmica por conducción		R(m ² K/W)=ΣR _i		4,441
Resistencia térmica superficial interior		R _{si} (m ² K/W)=1/h _i		0,13
Resistencia térmica superficial exterior		R _{se} (m ² K/W)=1/h _e		0,04
Resistencia térmica total		R _T (m ² K/W) =R _{si} +R+R _{se}		4,611
Transmitancia térmica		U(W/m ² K) = 1/R _T		0,22

(Fuente:[81], [112], [114]).

Tabla 3.17. Composición de la cubierta plana transitable convencional C₁.

Cubierta C ₁	Espesor	Conductividad	Densidad	Resistencia térmica
Materiales	(m)	(W/mK)	(kg/m ³)	R _i (m ² K/W)
Baldosa cerámica	0,015	1	2000	0,015
Mortero de cemento	0,04	1,8	2100	0,022
Lámina geotextil	0,001	0,05	120	0,020

Lámina de PVC	0,002	0,17	1390	0,012
Lámina geotextil	0,001	0,05	120	0,020
Poliestireno expandido	0,05	0,037	30	1,351
Lámina de polietileno	0,001	0,5	980	0,002
Hormigón en masa	0,07	2	2450	0,035
Losa alveolar con capa de compresión	0,3	1,579	1530	0,190
Cámara de aire sin ventilar	0,05			0,160
Placa de yeso laminado	0,015	0,25	825	0,060
Resistencia térmica por conducción	$R(m^2K/W)=\Sigma R_i$			1,887
Resistencia térmica superficial interior	$R_{si}(m^2K/W)=1/h_i$			0,1
Resistencia térmica superficial exterior	$R_{se}(m^2K/W)=1/h_e$			0,04
Resistencia térmica total	$R_T(m^2K/W) = R_{si}+R+R_{se}$			2,027
Transmitancia térmica	$U(W/m^2K) = 1/R_T$			0,49

(Fuente:[81], [112], [114]).

Tabla 3.18. Composición de la cubierta plana transitable invertida C₂.

Cubierta C ₂	Espesor	Conductividad	Densidad	Resistencia térmica
Materiales	(m)	(W/mK)	(kg/m ³)	R _i (m ² K/W)
Losa filtrante (base de XPS)	8,5	0,063	800	1,349
Lámina geotextil	0,001	0,05	120	0,020
Lámina de PVC	0,002	0,17	1390	0,012
Lámina geotextil	0,001	0,05	120	0,020
Hormigón en masa	0,07	2	2450	0,035
Losa alveolar con capa de compresión	0,3	1,579	1530	0,190
Cámara de aire sin ventilar	0,05			0,160
Placa de yeso laminado	0,015	0,25	825	0,060
Resistencia térmica por conducción	$R(m^2K/W)=\Sigma R_i$			1,846
Resistencia térmica superficial interior	$R_{si}(m^2K/W)=1/h_i$			0,1
Resistencia térmica superficial exterior	$R_{se}(m^2K/W)=1/h_e$			0,04
Resistencia térmica total	$R_T(m^2K/W) = R_{si}+R+R_{se}$			1,986
Transmitancia térmica	$U(W/m^2K) = 1/R_T$			0,50

(Fuente:[81], [112], [114]).

Tabla 3.19. Composición de las ventanas V₁ y V₂.

Ventanas	Tipo de marco	U (W/m ² K)
V ₁	PVC (3 cámaras)	1,8
V ₂	Metálico con rotura de puente térmico (entre 4 y 12 mm)	4

(Fuente:[81], [112], [114]).

Además de las modificaciones propuestas en los elementos constructivos, se plantea la modificación de la tipología de la vivienda que constituye el caso de estudio inicial. Las

dos tipologías consideradas para el análisis son: vivienda entre medianeras y dúplex en un bloque de viviendas. En ambas las fachadas este y oeste presentes en la vivienda aislada del caso de estudio inicial pasan a ser medianeras en contacto con otras viviendas. El cálculo de la transmitancia térmica de las mismas se ha realizado igual que en el caso de las fachadas, pero considerando las resistencias superficiales interiores a ambos lados del cerramiento. Para la comprobación del cumplimiento del valor de dicha transmitancia térmica con el límite establecido en el DB-HE1 se ha considerado que delimitan unidades de uso residencial entre sí, y el valor obtenido se observa que cumple con la limitación establecida para la zona climática de invierno B. La composición de estos nuevos cerramientos de la envolvente térmica se muestra en la Tabla 3.20. Los planos de planta de la vivienda entre medianeras y en bloque se muestran en las Figuras 3.2. y 3.3.

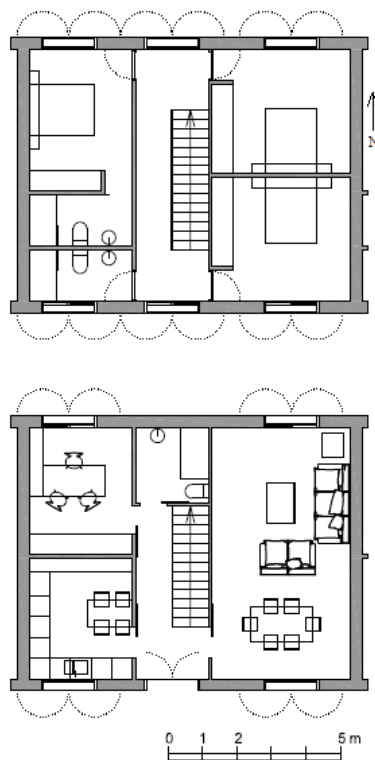


Figura 3.2. Planos de planta de la vivienda entre medianeras.

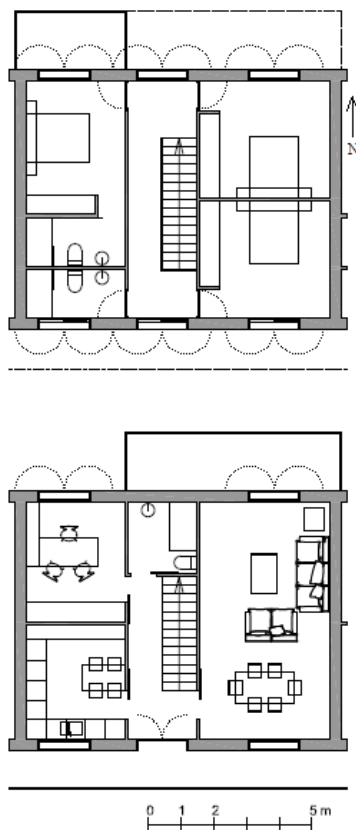


Figura 3.3. Planos de planta de la vivienda en bloque (dúplex).

Tabla 3.20. Composición de las medianeras en el caso de la vivienda entre medianeras y el dúplex.

Medianeras	Espesor	Conductividad	Densidad	Resistencia térmica
Materiales	(m)	(W/mK)	(kg/m ³)	R _i (m ² K/W)
Enlucido de yeso	0,015	0,57	1150	0,026
BH perforado áridos ligeros	0,24	0,289	850	0,830
Lana mineral (MW)	0,04	0,04	40	1,000
BH perforado áridos ligeros	0,24	0,289	850	0,830
Enlucido de yeso	0,015	0,57	1150	0,026
Resistencia térmica por conducción		$R(\text{m}^2\text{K/W})=\Sigma R_i$		2,714
Resistencia térmica superficial interior		$R_{si}(\text{m}^2\text{K/W})=1/h_i$		0,13
Resistencia térmica superficial exterior		$R_{se}(\text{m}^2\text{K/W})=1/h_e$		0,13
Resistencia térmica total		$R_T(\text{m}^2\text{K/W})=R_{si}+R+R_{se}$		2,974
Transmitancia térmica		$U(\text{W/m}^2\text{K})=1/R_T$		0,34

(Fuente:[81], [112], [114]).

La adaptación de la vivienda inicial a un dúplex provoca además un cambio estructural, ya que se pasa de muros de carga a una estructura con pilares y jácenas de hormigón armado. En este caso, además, el suelo en contacto con el terreno y la cubierta del caso

inicial pasan a ser forjados interiores en contacto con otras viviendas (ver Tabla 3.6.). Además, se han añadido pasarelas exteriores cada dos plantas para permitir el acceso a las viviendas y dos balcones en la fachada de orientación norte. La composición tanto de los balcones como de las pasarelas de acceso se muestra en la Tabla 3.21.

Tabla 3.21. Composición de los balcones y las pasarelas de acceso en el caso del dúplex.

Balcones/ Pasarelas de acceso	Espesor	Conductividad	Densidad	Resistencia térmica
Materiales	(m)	(W/mK)	(kg/m ³)	R _i (m ² K/W)
Baldosa cerámica	0,015	1	2000	0,015
Mortero de cemento	0,04	1,8	2100	0,022
Lámina geotextil	0,001	0,05	120	0,020
Lámina de PVC	0,002	0,17	1390	0,012
Lámina geotextil	0,001	0,05	120	0,020
Hormigón en masa	0,07	2	2450	0,035
Losa alveolar con capa de compresión	0,3	1,579	1530	0,190

(Fuente:[81], [112], [114]).

Propuesta de escenarios

En la Tabla 3.22., se muestra la propuesta de escenarios y subescenarios para el análisis. En dicha tabla se especifica la tipología de vivienda, la clasificación del escenario o sub-escenario, los cambios realizados en cada caso concreto y se añade, además, una descripción abreviada que será utilizada en las figuras. En las tres tipologías de vivienda consideradas, el escenario en que los cerramientos se corresponden con los del caso de estudio inicial adquiere el nombre de “caso base”. El subíndice “i” hace referencia a la tipología de la vivienda, correspondiendo el número 1 a la vivienda aislada, el número 2 a la vivienda entre medianeras y el número 3 al dúplex.

Tabla 3.22. Propuesta de escenarios y subescenarios para el análisis.

Tipología	Escenarios	Subescenarios	Modificaciones	Descripción abreviada
VIVIENDA AISLADA	Esc. 1.0.	Caso base ₁	-	MW
	Esc. 1.1.	Subesc. 1.1.1.	F ₁ en lugar de F ₀	EPS
		Subesc. 1.1.2.	F ₂ en lugar de F ₀	PUR
	Esc. 1.2.	Subesc. 1.2.1.	C ₁ en lugar de C ₀	MW+CUB.PL.C1
		Subesc. 1.2.2.	C ₂ en lugar de C ₀	MW+CUB.PL.C2
	Esc. 1.3.	Subesc. 1.3.1.	F ₃ en lugar de F ₀	AISL. EXT. XPS
		Subesc. 1.3.2.	F ₄ en lugar de F ₀	AISL. EXT. PUR

		Subesc. 1.4.1.	F_{0LC} en lugar de F_0	MW+LC
		Subesc. 1.4.2.	F_{1LC} en lugar de F_0	EPS+LC
		Subesc. 1.4.3.	F_{2LC} en lugar de F_0	PUR+LC
	Esc. 1.4.	Subesc. 1.4.4.	F_{0LC} en lugar de F_0 y C_1 en lugar de C_0	MW+LC+CUB.PL.C1
		Subesc. 1.4.5.	F_{0LC} en lugar de F_0 y C_2 en lugar de C_0	MW+LC+CUB.PL.C2
		Subesc. 1.4.6.	F_{3LC} en lugar de F_0	AISL. EXT. XPS+LC
		Subesc. 1.4.7.	F_{4LC} en lugar de F_0	AISL. EXT. PUR+LC
	Esc. 1.5.	Subesc. 1.5.1.	V_1 en lugar de V_0	MARC.PVC
		Subesc. 1.5.2.	V_2 en lugar de V_0	MARC.METÁL.
	Esc. 2.0.	Caso base ₂	Cambio tipología	MW
	Esc. 2.1.	Subesc. 2.1.1.	F_1 en lugar de F_0	EPS
		Subesc. 2.1.2.	F_2 en lugar de F_0	PUR
	Esc. 2.2.	Subesc. 2.2.1.	C_1 en lugar de C_0	MW+CUB.PL.C1
		Subesc. 2.2.2.	C_2 en lugar de C_0	MW+CUB.PL.C2
	Esc. 2.3.	Subesc. 2.3.1.	F_3 en lugar de F_0	AISL. EXT. XPS
		Subesc. 2.3.2.	F_4 en lugar de F_0	AISL. EXT. PUR
VIVIENDA ENTRE MEDIANERAS		Subesc. 2.4.1.	F_{0LC} en lugar de F_0	MW+LC
		Subesc. 2.4.2.	F_{1LC} en lugar de F_0	EPS+LC
		Subesc. 2.4.3.	F_{2LC} en lugar de F_0	PUR+LC
	Esc. 2.4.	Subesc. 2.4.4.	F_{0LC} en lugar de F_0 y C_1 en lugar de C_0	MW+LC+CUB.PL.C1
		Subesc. 2.4.5.	F_{0LC} en lugar de F_0 y C_2 en lugar de C_0	MW+LC+CUB.PL.C2
		Subesc. 2.4.6.	F_{3LC} en lugar de F_0	AISL. EXT. XPS+LC
		Subesc. 2.4.7.	F_{4LC} en lugar de F_0	AISL. EXT. PUR+LC
	Esc. 2.5.	Subesc. 2.5.1.	V_1 en lugar de V_0	MARC.PVC
		Subesc. 2.5.2.	V_2 en lugar de V_0	MARC.METÁL.
	VIVIENDA EN BLOQUE	Esc. 3.0.	Caso base ₃	Cambio tipología
Esc. 3.1.		Subesc. 3.1.1.	F_1 en lugar de F_0	EPS
		Subesc. 3.1.2.	F_2 en lugar de F_0	PUR

Esc. 3.2.	Subesc. 3.2.1.	C ₁ en lugar de C ₀	MW+CUB.PL.C1
	Subesc. 3.2.2.	C ₂ en lugar de C ₀	MW+CUB.PL.C2
Esc. 3.3.	Subesc. 3.3.1.	F ₃ en lugar de F ₀	AISL. EXT. XPS
	Subesc. 3.3.2.	F ₄ en lugar de F ₀	AISL. EXT. PUR
Esc. 3.4.	Subesc. 3.4.1.	F _{0LC} en lugar de F ₀	MW+LC
	Subesc. 3.4.2.	F _{1LC} en lugar de F ₀	EPS+LC
	Subesc. 3.4.3.	F _{2LC} en lugar de F ₀	PUR+LC
	Subesc. 3.4.4.	F _{0LC} en lugar de F ₀ y C ₁ en lugar de C ₀	MW+LC+CUB.PL.C1
	Subesc. 3.4.5.	F _{0LC} en lugar de F ₀ y C ₂ en lugar de C ₀	MW+LC+CUB.PL.C2
	Subesc. 3.4.6.	F _{3LC} en lugar de F ₀	AISL. EXT. XPS+LC
	Subesc. 3.4.7.	F _{4LC} en lugar de F ₀	AISL. EXT. PUR+LC
Esc. 3.5.	Subesc. 3.5.1.	V ₁ en lugar de V ₀	MARC.PVC
	Subesc. 3.5.2.	V ₂ en lugar de V ₀	MARC.METÁL.

*Abreviaturas utilizadas en la tabla: MW: lana mineral (“mineral wool”); EPS: poliestireno expandido (“expanded polystyrene”); PUR: poliuretano (“polyurethane”); XPS: poliestireno extruido (“extruded polystyrene”); CUB. PL.: cubierta plana; AISL. EXT.: aislamiento exterior; LC: ladrillo cerámico de ½ pie; MARC.: marcos de las ventanas; PVC: policloruro de vinilo (“polyvinyl chloride”); MARC. METÁL: marcos metálicos de aluminio lacado.

Además de los escenarios y subescenarios expuestos en la Tabla 3.22., se propone el análisis del efecto que tendría sobre los resultados el hecho de romper los puentes térmicos presentes en los frentes de forjado y en los pilares. En el caso de la obtención de la demanda energética, se va a hacer uso de los valores para la transmitancia térmica lineal ψ (W/mK) incluidos en el catálogo de la HU, que se corresponde con el contenido en el DA-DB-HE/3, teniendo en cuenta la similitud de las soluciones constructivas consideradas. No se van a proponer, por tanto, soluciones específicas para su tratamiento. El análisis de puentes térmicos es un tema muchas veces olvidado y se precisaría de un estudio detallado para cada uno de los encuentros analizados.

Finalmente, teniendo en cuenta todas las modificaciones propuestas, así como el tratamiento de los puentes térmicos, el número total de casos a evaluar en este capítulo asciende a 92.

Análisis de la demanda energética

Creación del modelo 3D en la HU

Como ya se ha especificado en el apartado de metodología la aplicación utilizada para la evaluación de la demanda energética de calefacción y refrigeración es la Herramienta Unificada Lider-Calener, HU, programa oficial reconocido para la certificación energética, la limitación de la demanda y el consumo energético en España. En la Figura 3.4., se muestra el modelo 3D creado en la HU para la vivienda aislada.

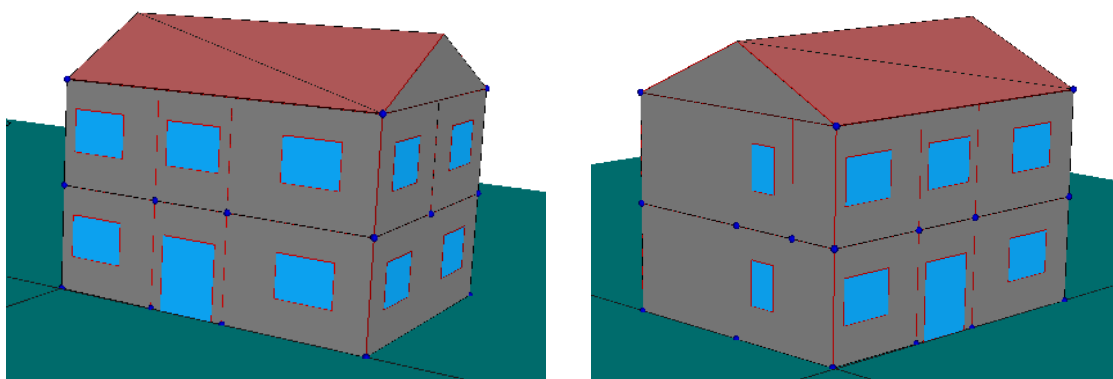


Figura 3.4. Imágenes del caso de estudio inicial en la representación 3D de la Herramienta Unificada LIDER-CALENER.

En el escenario 2.0., se va a evaluar una vivienda entre medianeras. La representación del modelo 3D en la HU (ver Figura 3.5.), en este caso concreto, se ha llevado a cabo con las siguientes modificaciones:

-La tipología de vivienda se ha modificado en la herramienta informática a “vivienda entre medianeras”.

-Las fachadas de orientación este y oeste pasan a ser medianeras, con la consiguiente eliminación de los huecos existentes en dichas fachadas respecto al caso base₁. La composición de dichos cerramientos de la envolvente térmica se puede observar en la Tabla 3.20.

Tanto la orientación de la vivienda, como las características y composición del resto de elementos constructivos no varían con respecto al caso de estudio inicial.

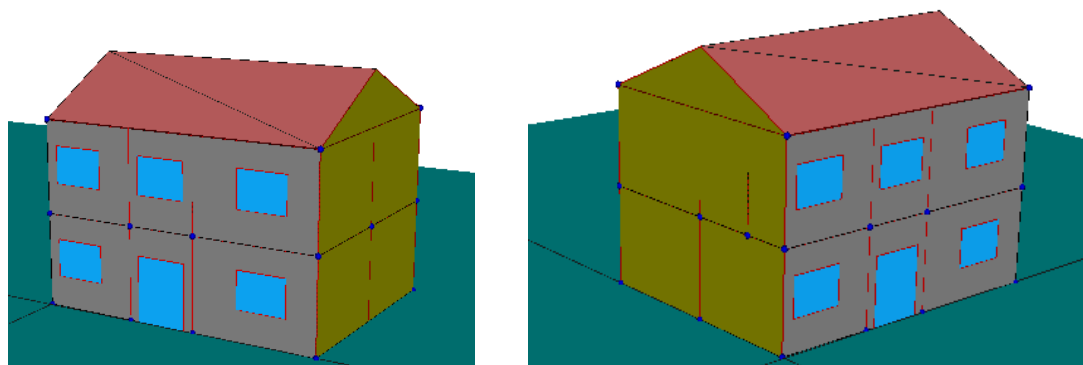


Figura 3.5. Imágenes de la vivienda entre medianeras en la representación 3D de la Herramienta Unificada LIDER.

En el escenario 3.0., se va a evaluar un dúplex en un edificio de viviendas. El dúplex utilizado para el análisis se ha obtenido llevando a cabo las modificaciones correspondientes en la vivienda aislada definida como caso base₁. Dichas modificaciones se detallan a continuación:

-La tipología de vivienda se ha modificado en la herramienta informática a “vivienda dentro de un bloque”.

-Las fachadas de orientación este y oeste pasan a ser medianeras, con la consiguiente eliminación de los huecos existentes en dichas fachadas respecto al caso base₁. La composición de dichos cerramientos de la envolvente térmica se corresponde con la ya definida en el caso de la vivienda entre medianeras del escenario 2.0. (Ver Tabla 3.20.).

-Se ha considerado que la vivienda se encuentra situada a una altura intermedia dentro del bloque de viviendas, y por tanto la cubierta y el suelo en contacto con el terreno desaparecen. En su lugar se han definido forjados interiores adiabáticos que hacen de separación con las viviendas superior e inferior. Su composición se corresponde con la mostrada en la Tabla 3.6.

-Al tratarse de un bloque de viviendas e incluirse pilares en su estructura, en la definición llevada a cabo en el modelo informático se ha procedido a incluir el número de pilares susceptibles de crear un puente térmico en cada uno de los espacios.

-Como se puede observar en los planos de planta (ver Figura 3.3.), la vivienda tiene dos balcones de 1,8 m de anchura, tanto en la planta inferior como en la superior, así como una pasarela exterior (en la planta inferior) de acceso a la vivienda. Los balcones, al no formar parte de la envolvente del edificio y ser elementos exteriores al mismo, se representan en la herramienta informática a partir de elementos de sombra. Se ha descartado, por tanto, la representación en la vista 3D tanto de la galería de acceso como del balcón de la planta inferior por ejercer sombra sobre la vivienda inmediatamente inferior, que está fuera de los límites de este estudio. Sí se han representado, sin embargo, el balcón correspondiente a la planta superior del dúplex, así como la galería de acceso y el balcón correspondientes a la vivienda situada sobre la evaluada. Respecto a los puentes térmicos de frente de forjado, se ha considerado el porcentaje de longitud de puente térmico que se vería afectado por la presencia del balcón, es decir, la longitud de frente de forjado en el cual se rompe la continuidad del aislante térmico de la fachada.

-Respecto a las ventanas, se han llevado a cabo las siguientes modificaciones:

-Se ha modificado la dimensión “y” (elevación respecto del suelo) a 1,6 m en aquellas ventanas situadas en la fachada que da a la pasarela de acceso de la vivienda.

-Las ventanas situadas junto a los balcones han sido sustituidas por puertas acristaladas con la misma composición (marco-vidrio) que las ventanas del resto de la vivienda.

La orientación de la vivienda y la composición del resto de elementos que la componen, permanecen invariables.

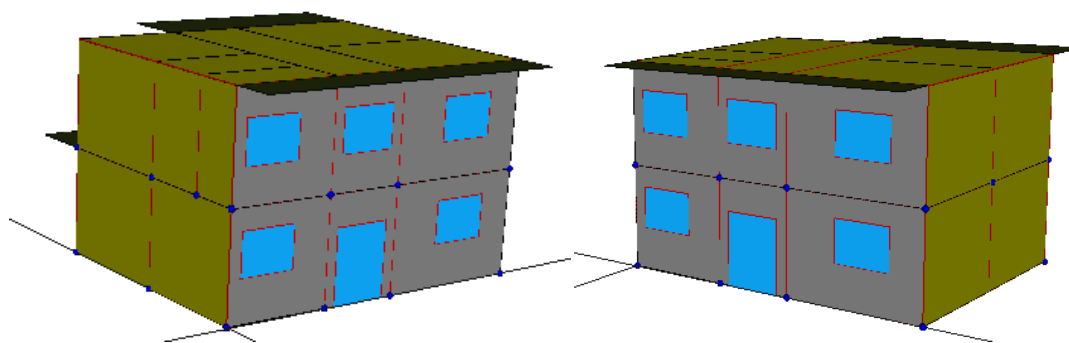


Figura 3.6. Imágenes de la vivienda en bloque (dúplex) en la representación 3D de la Herramienta Unificada LIDER-CALENER.

Análisis de la energía cautiva inicial (IEE)

La energía cautiva se define como la energía necesaria para fabricar un producto y en ella se pueden distinguir dos componentes: la energía cautiva inicial y la recurrente [117]. La primera de ellas fue definida por Cole y Kernan [32] como la energía utilizada para construir un edificio desde la extracción de materias primas hasta la construcción in situ del mismo. La energía cautiva recurrente está asociada a los procesos de mantenimiento durante la vida útil del edificio [32]. El estudio presentado en este capítulo se va a limitar al análisis de la IEE, que tal como ya se especificó en el “Desarrollo general” de la Metodología, no incluye en este caso los procesos de construcción del edificio in situ ni el transporte de los materiales de construcción desde la fábrica hasta los puntos de consumo. En esta parte del estudio, se han calculado las variaciones de la IEE para cada subescenario con respecto a la vivienda inicial. Para ello se ha llevado a cabo un cálculo previo de los valores de la IEE para los diferentes elementos constructivos que se ven modificados en cada uno de los subescenarios.

Todos los resultados de este capítulo se han presentado en función de la superficie útil del edificio, por tanto, ha sido necesario mantener constante dicha superficie en cada uno de los subescenarios analizados, para mantener la coherencia del estudio. En el caso de las fachadas, tal como se podrá observar en el apartado de resultados, no todas ellas presentan el mismo espesor. Este hecho se ha tenido en cuenta a la hora de calcular la superficie de los forjados estructurales del edificio y el valor de su IEE para cada caso concreto. Además, dependiendo del tipo de fachada considerada, la cantidad de materiales que pasan por delante de los frentes de forjado, y los que reposan sobre los forjados son diferentes, y por tanto sus superficies varían modificando los valores de la IEE. En el caso de la vivienda en bloque (dúplex), el cambio de una disposición de muros de carga a una disposición de pilares de hormigón armado con jácenas provocó la necesidad de llevar a cabo el cálculo de la IEE de estos nuevos elementos, no incluidos en las otras tipologías de edificio analizadas. Además, en este caso concreto, se añadió una pasarela de paso cada dos alturas para conectar el núcleo de comunicación en vertical con el acceso a las viviendas y se añadieron balcones en una de las fachadas. Los valores de IEE de balcones y pasarelas de acceso se han incluido en el cálculo. En la vivienda aislada o entre medianeras, no se han considerado accesos o caminos, por no ser estrictamente necesarios. Los tabiques palomeros presentes en la cubierta inclinada

se han incluido en los cálculos. Por otra parte, se ha calculado el incremento de IEE que supondría el incremento de aislamiento para evitar el puente térmico en frentes de forjado y pilares. En el caso de la vivienda entre medianeras y el dúplex, sólo una de las paredes medianeras se ha incluido en el cálculo, ya que éstas son compartidas con las viviendas adyacentes. En el caso del dúplex, la misma consideración se hizo con los forjados de separación con las viviendas superior e inferior, y por tanto, sólo uno de estos forjados se ha incluido en los cálculos. Los valores de IEE se han presentado en términos de energía primaria por m² de superficie útil.

Consumo energético versus energía cautiva (IEE)

En la última parte del análisis, se ha llevado a cabo una estimación del consumo energético de la vivienda. Para ello se han utilizado los valores de demanda energética obtenidos para cada uno de los subescenarios, se han definido tres sistemas de climatización con niveles de eficiencia energética diferentes y se ha considerado un tiempo de vida para el edificio de 50 años. Los sistemas de climatización considerados se describen en la Tabla 3.23. El objetivo de este análisis es la comparación de las variaciones de IEE frente a las necesidades energéticas del edificio durante su tiempo de vida. Para poder llevar a cabo esta comparación se han calculado los consumos energéticos en términos de energía primaria y los factores de conversión utilizados han sido los siguientes: 3.154 (electricidad), 1.182 (gasoil) y 1.195 (gas natural) [93].

Tabla 3.23. Sistemas de climatización considerados para estimación del consumo energético.

	Sistema A	Sistema B	Sistema C
Calefacción	Caldera de gasoil ($\eta=0,85$)	Caldera de condensación (gas natural) ($\eta=1,05$)	Bomba de calor (COP=3,5; EER= 3)
Refrigeración	Sistema multisplit (EER=2)	Sistema multisplit (EER=2,5)	

η : rendimiento; EER (Energy Efficiency Ratio): coeficiente de eficiencia energética de una máquina frigorífica en modo refrigeración (potencia frigorífica/potencia eléctrica consumida para refrigerar); COP (Coefficient Of Performance): coeficiente de rendimiento de una máquina frigorífica en modo calefacción (potencia frigorífica/potencia eléctrica consumida para calefactar).

El clima en las Islas Baleares

Las Islas Baleares (zona climática B3 según el CTE [16]) presentan un clima mediterráneo típico, caracterizado por veranos secos y calurosos. En la Tabla 3.24. se muestran los valores climatológicos normales proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología, a partir de los datos de la estación del Aeropuerto Son Sant Joan de Palma de Mallorca, para el periodo 1981-2010 [118]. En la Tabla 3.25. se muestran los grados día de calefacción y refrigeración para diferentes ciudades situadas en clima mediterráneo para el periodo 2010-2014 [119].

Tabla 3.24. Valores climatológicos normales para las Islas Baleares en el periodo 1981-2010.

Palma de Mallorca (Aeropuerto de Son Sant Joan)	
Latitud: 39° 33' 39" N Longitud: 2° 44' 12" E (39.56N, 2.74 E)	
Temperatura media anual de las temperaturas máximas diarias (°C)	22.4
Temperatura media anual de las temperaturas mínimas diarias (°C)	10.6
Temperatura media anual (°C)	16.5
Humedad relativa media (%)	72

Fuente: [118].

Tabla 3.25. Grados día de calefacción y refrigeración en diferentes ciudades de clima mediterráneo, para el periodo 2010-2014.

	Palma de Mallorca	Barcelona	Roma	Atenas
Estación	Aeropuerto de Son Sant Joan (39.56N, 2.74 E)	Aeropuerto de Barcelona-El Prat (41.29N,2.07E)	Aeropuerto de Fiumicino (41.80N, 12.24E)	Aeropuerto Internacional de Atenas (38.06N, 23.56E)
GDcal con temperatura base 15°C	667	671	860	657
GDref con temperatura base 22°C	413	275	303	755

Fuente: [119].

Límites del análisis

En la evaluación de la demanda energética, el elevado número de subescenarios analizados ha hecho necesario el uso del catálogo de puentes térmicos incluido en la herramienta utilizada, HU [81]. Este catálogo está basado en el Documento de Apoyo al CTE, DA DB-HE/3 Puentes Térmicos del Ministerio de Fomento [120], y proporciona valores aproximados para el valor de la transmitancia térmica lineal, ψ (W/mK).

En el análisis de la energía cautiva, no se ha analizado el valor total de la IEE del edificio en ninguno de los subescenarios. En el cálculo de la IEE, los materiales utilizados para el encofrado de pilares y vigas, no se han incluido en el estudio ya que la mayoría de ellos pueden ser utilizados en repetidas ocasiones. En el caso de los zunchos, el valor de su IEE es sólo un 0,4% superior al de los forjados. Por tanto, en este caso, se ha llevado a cabo una simplificación de los cálculos, considerando el valor de IEE asociado a los forjados en toda la superficie. En el caso del dúplex, el aislamiento de los frentes de forjado, no ha incluido la rotura del puente térmico en balcones y pasarelas de acceso. En el análisis no se ha llevado a cabo el cálculo de la IEE de aquellos elementos constructivos que no se han visto modificados en ninguno de los subescenarios. Respecto a la energía cautiva recurrente, ésta no ha sido incluida en

el análisis. Sin embargo, al haberse analizado únicamente las variaciones con respecto a un caso base, se ha considerado que la energía derivada de los procesos de mantenimiento del edificio no variarán al tratarse de la misma vivienda o presentarán valores despreciables. Además, el tiempo de vida considerado para el edificio es de 50 años, y tal como demostraron Rauf y Crawford [121] la energía cautiva inicial domina el ciclo de vida de los edificios durante los primeros 50 años, mientras que el papel de la energía cautiva recurrente se ve incrementado para tiempos de vida de entre 50 y 150 años.

En la última parte del estudio, la estimación del consumo energético se ha llevado a cabo a partir de los valores de demanda energética y los valores de eficiencia energética de los sistemas considerados. Dicho valor de consumo se ha considerado constante durante los 50 años establecidos para el tiempo de vida del edificio. Además no se han considerado las futuras variaciones de los factores de energía primaria utilizados en el cálculo.

Resultados

Análisis de la demanda energética

Los resultados obtenidos para la demanda energética anual de calefacción y refrigeración en todos los subescenarios evaluados se muestran en las Figuras 3.7. y 3.8. El límite máximo establecido en el DB-HE1 [82] para la zona climática B3 es de 15 kWh/m²año, tanto para la demanda de calefacción como para la de refrigeración. En el caso de estudio inicial, se observa que sólo se cumpliría con dicha limitación en el caso de rotura de los puentes térmicos en los frentes de forjado. En las Figuras 3.9. y 3.10. se muestran los resultados obtenidos para la demanda energética anual si se considera la rotura del puente térmico presente en los frentes de forjado en aquellos casos en que había interrupción del aislamiento en las fachadas. En los casos en que el aislamiento es exterior los resultados son los mismos que los ya mostrados en las Figuras 3.7. y 3.8., por considerarse solucionados desde un principio este tipo de encuentros. En las Figuras 3.11., 3.12., 3.13., 3.14., se muestran las variaciones producidas en la demanda energética de calefacción y refrigeración en cada uno de los subescenarios evaluados con respecto a su caso base, en las tres tipologías de vivienda. (Ver Tabla II.1 en el Anexo II).

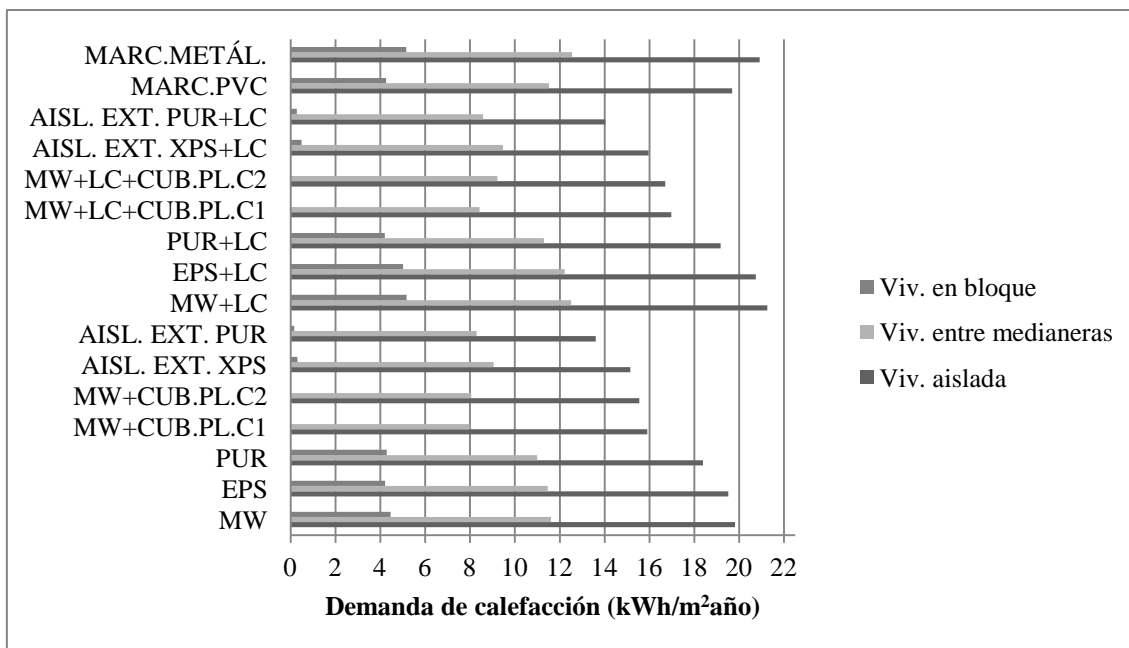


Figura 3.7. Demanda de calefacción anual para las tres tipologías de vivienda.

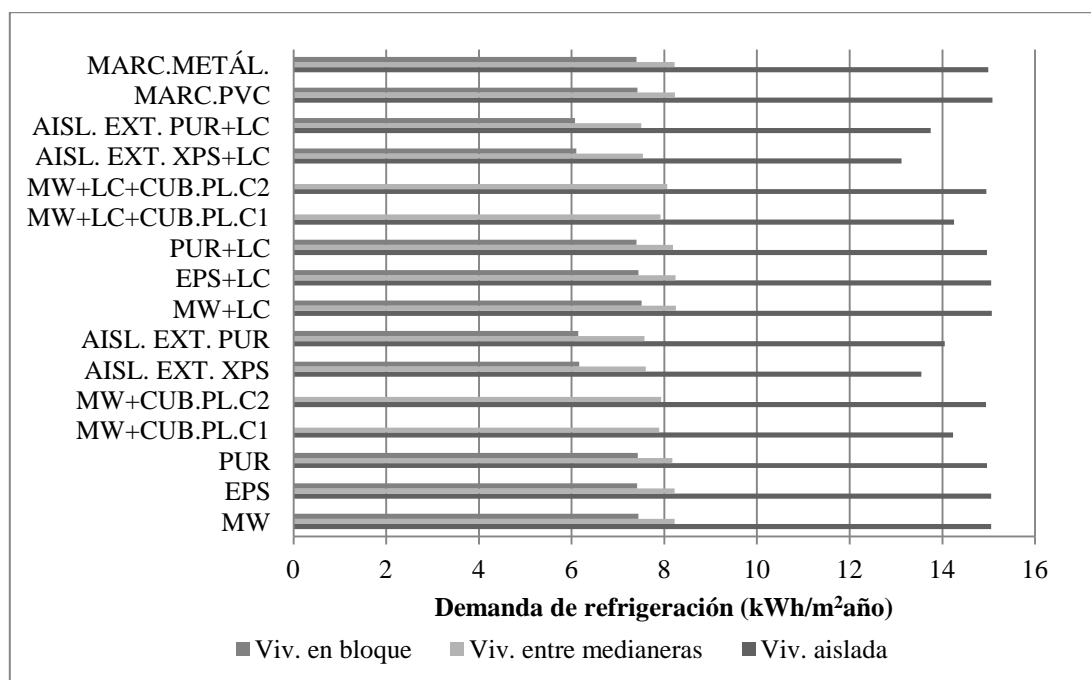


Figura 3.8. Demanda de refrigeración anual para las tres tipologías de vivienda.

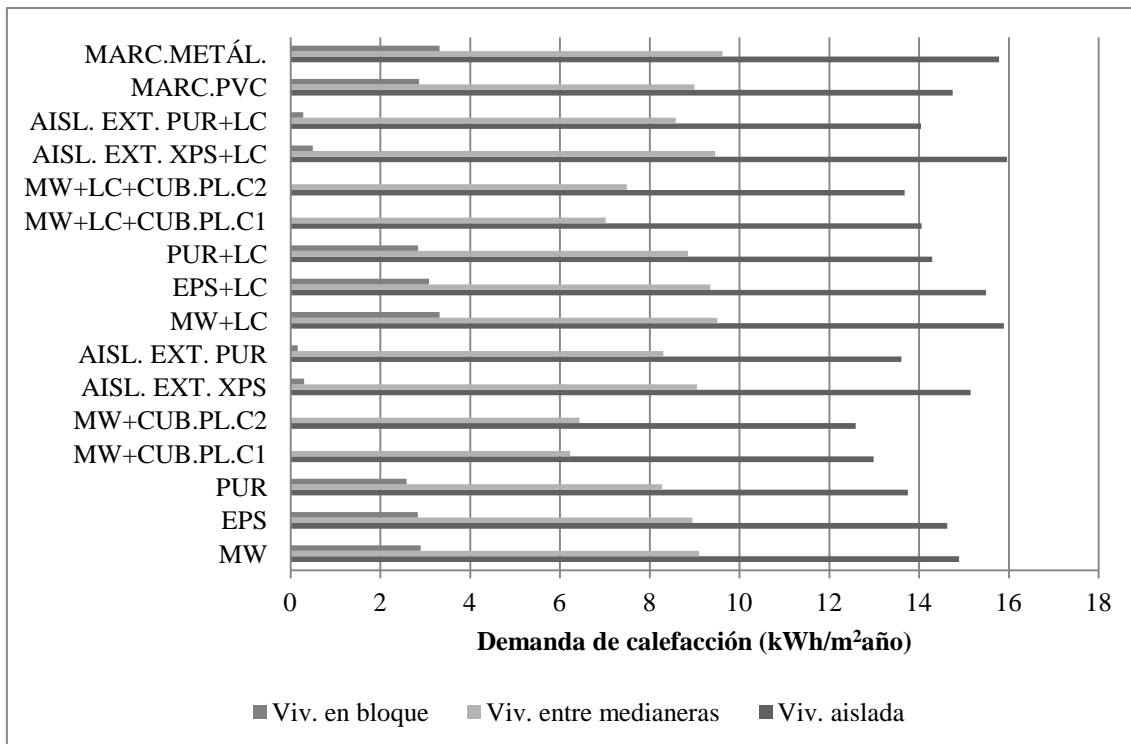


Figura 3.9. Demanda de calefacción anual para las tres tipologías de vivienda considerando rotura del puente térmico en frentes de forjado.

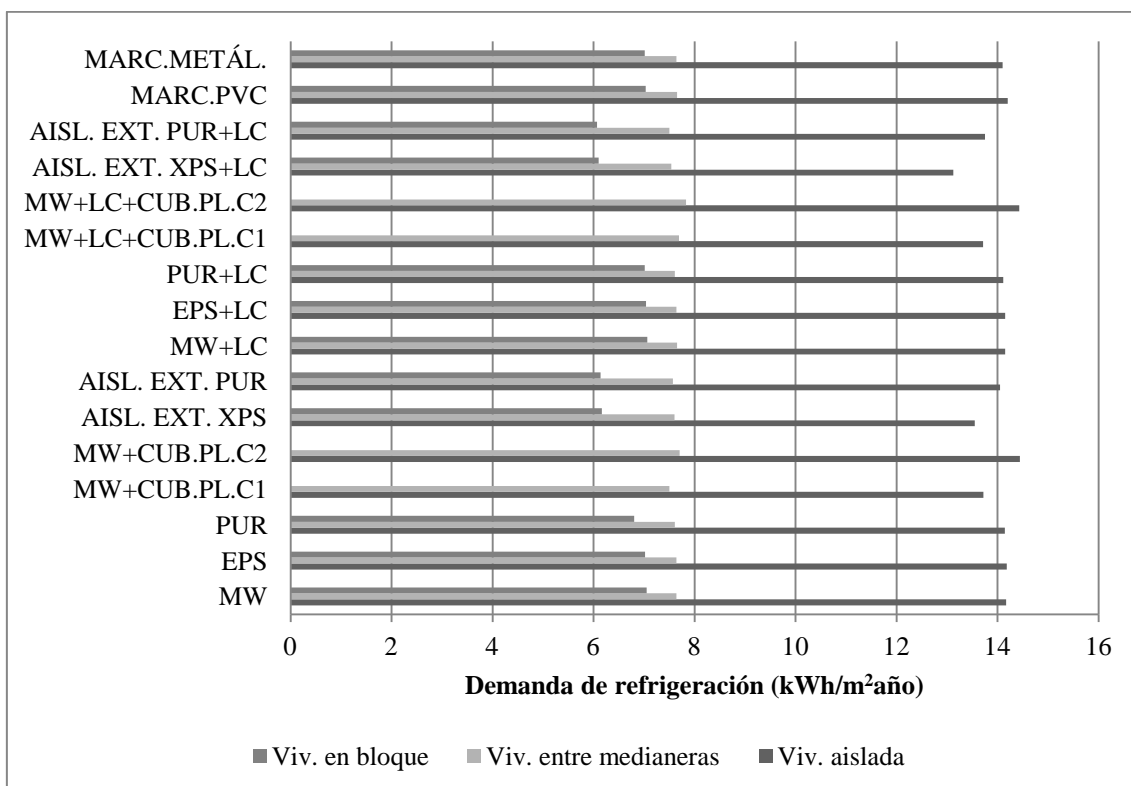


Figura 3.10. Demanda de refrigeración anual para las tres tipologías de vivienda considerando rotura del puente térmico en frentes de forjado.

A partir de los resultados obtenidos, se observa que la modificación de la tipología de vivienda de una aislada a una entre medianeras o en bloque, provoca significativas reducciones de la demanda energética anual. Si se comparan los casos base, correspondientes a las tres tipologías, se observa que la conversión de la vivienda aislada a una vivienda entre medianeras provoca reducciones superiores al 40%, tanto en la demanda de calefacción como en la de refrigeración. En el caso de la vivienda en bloque (dúplex), estas reducciones superan el 70% en la demanda de calefacción y el 50% en la de refrigeración. Al evaluar la rotura del puente térmico en frentes de forjado se observa que en el caso de estudio inicial (caso base₁) se producen reducciones próximas al 25% en la demanda de calefacción y cerca del 6% en la demanda de refrigeración. Si se tienen en cuenta todos los subescenarios evaluados, la reducción de la demanda de calefacción se encuentra entre el 16% y el 26%, en el caso de la vivienda aislada y la vivienda entre medianeras, y cerca del 30% en el caso de la vivienda en bloque (dúplex). Las reducciones obtenidas en la demanda de refrigeración no superan el 9% en ningún caso.

Si se analizan las modificaciones llevadas a cabo en cada uno de los subescenarios se observa que, en el caso de la vivienda aislada las mayores reducciones en la demanda de calefacción se producen al utilizar aislamiento exterior en las fachadas, seguido de la sustitución de la cubierta inclinada por una cubierta plana transitable. La mayor reducción de la demanda de refrigeración se observa en el subescenario en que se ha utilizado aislamiento exterior de poliestireno extruido (XPS) en las fachadas junto con la sustitución del bloque de hormigón por un ladrillo cerámico de ½ pie. La sustitución de los marcos de madera de las ventanas por marcos de PVC muestra variaciones inferiores al 1% tanto en la demanda de calefacción como en la de refrigeración. Su sustitución por marcos de aluminio lacado provoca un incremento del 5% en la demanda de calefacción y una reducción despreciable, por debajo del 0,5%, en la de refrigeración.

En el caso de la vivienda entre medianeras, las mayores reducciones de la demanda de calefacción se observan en aquellos subescenarios en los cuales se ha llevado a cabo la sustitución de la cubierta inclinada por una cubierta plana, seguidos de aquellos en que se ha utilizado aislamiento exterior en las fachadas. Las mayores reducciones de la demanda de refrigeración se observan en aquellos subescenarios en los cuales se ha utilizado aislamiento exterior en las fachadas, junto con ladrillos cerámicos en lugar del bloque de hormigón de 24 cm. La sustitución de los marcos de madera de las ventanas por marcos de PVC muestra variaciones poco significativas tanto en la demanda de calefacción como en la de refrigeración. Al considerar la sustitución de los marcos de madera por marcos de aluminio lacado, se observa un incremento del 8% en la demanda de calefacción, mientras que la variación de la demanda de refrigeración es despreciable. En el caso de la vivienda en bloque (dúplex) las mayores reducciones se observan cuando un aislamiento exterior de poliuretano (PUR) es utilizado en las fachadas. En este caso, la sustitución de los marcos de las ventanas originales por marcos de PVC muestra una reducción próxima al 4% para la demanda de calefacción y del 0,3% para la demanda de refrigeración. Si se considera su sustitución por marcos de aluminio lacado, se observa un incremento de la demanda de calefacción del 16% y un incremento inferior al 0,6% de la demanda de refrigeración. A grandes rasgos, se

observa que en las tres tipologías la utilización de lana mineral (MW) o poliestireno expandido (EPS) junto con ladrillos cerámicos en las fachadas, así como la utilización de marcos de aluminio lacado, provoca incrementos de la demanda de calefacción con variaciones insignificantes de la demanda de refrigeración.

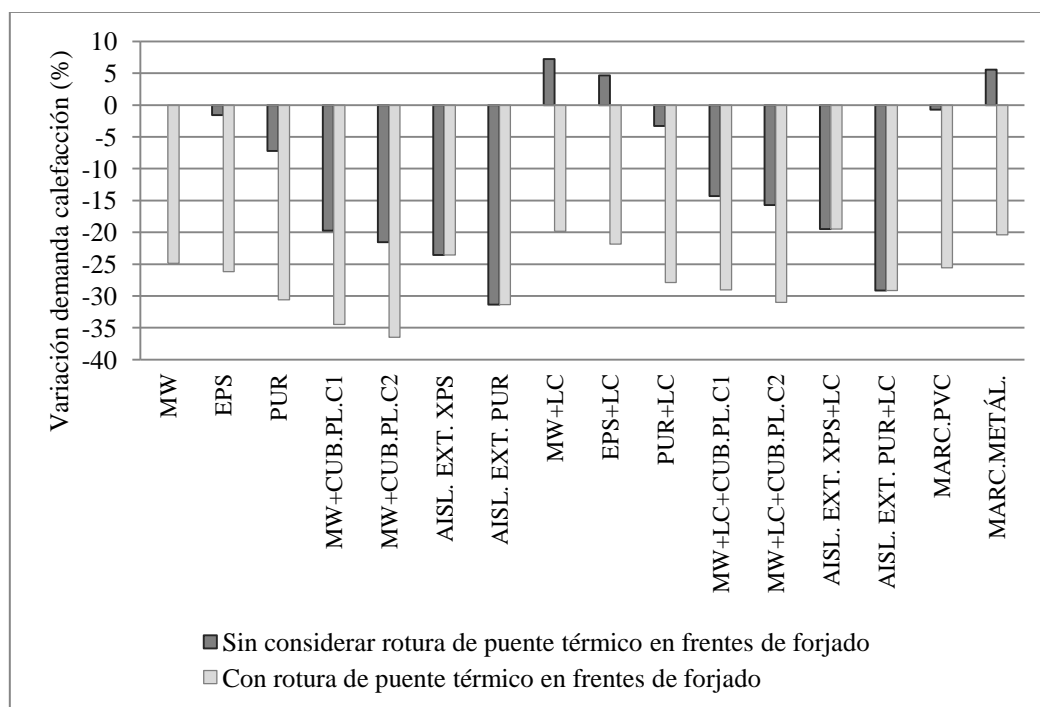


Figura 3.11. Variaciones en la demanda anual de calefacción en los subescenarios de la vivienda aislada con respecto al caso base₁.

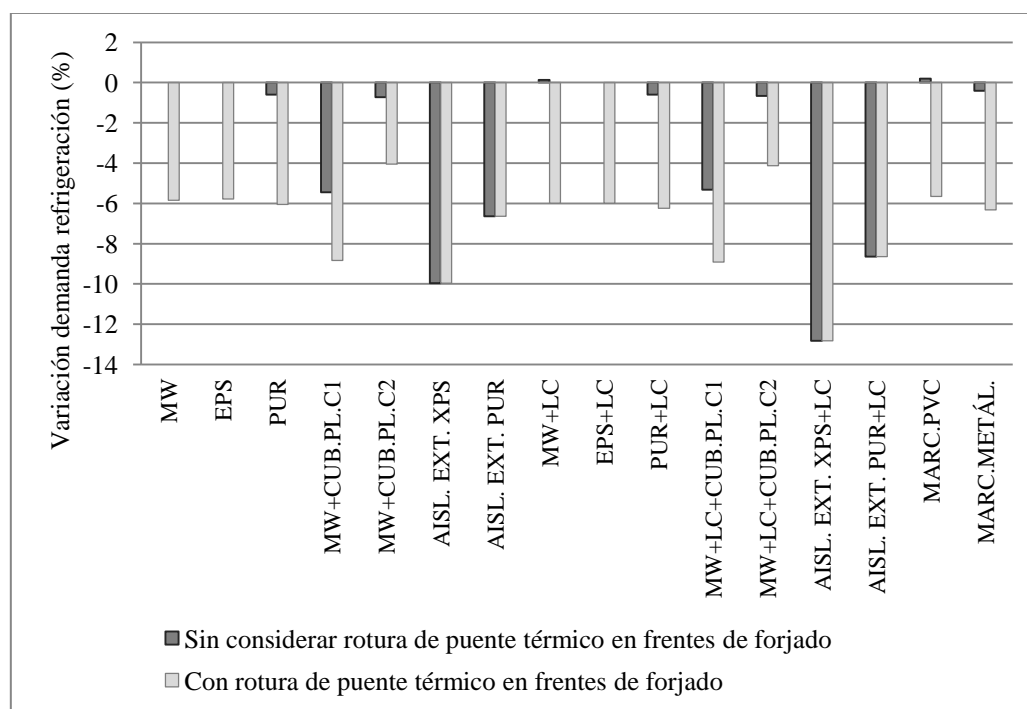


Figura 3.12. Variaciones en la demanda anual de refrigeración en los subescenarios de la vivienda aislada con respecto al caso base₁.

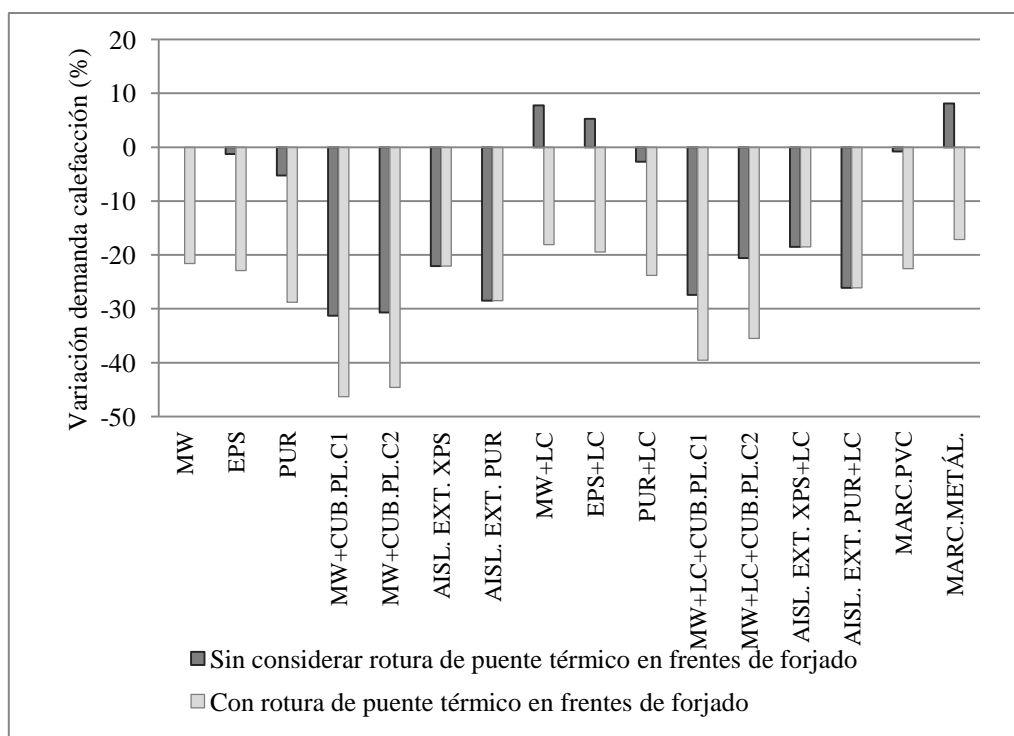


Figura 3.13. Variaciones en la demanda anual de calefacción en los subescenarios de la vivienda entre medianeras con respecto al caso base₂.

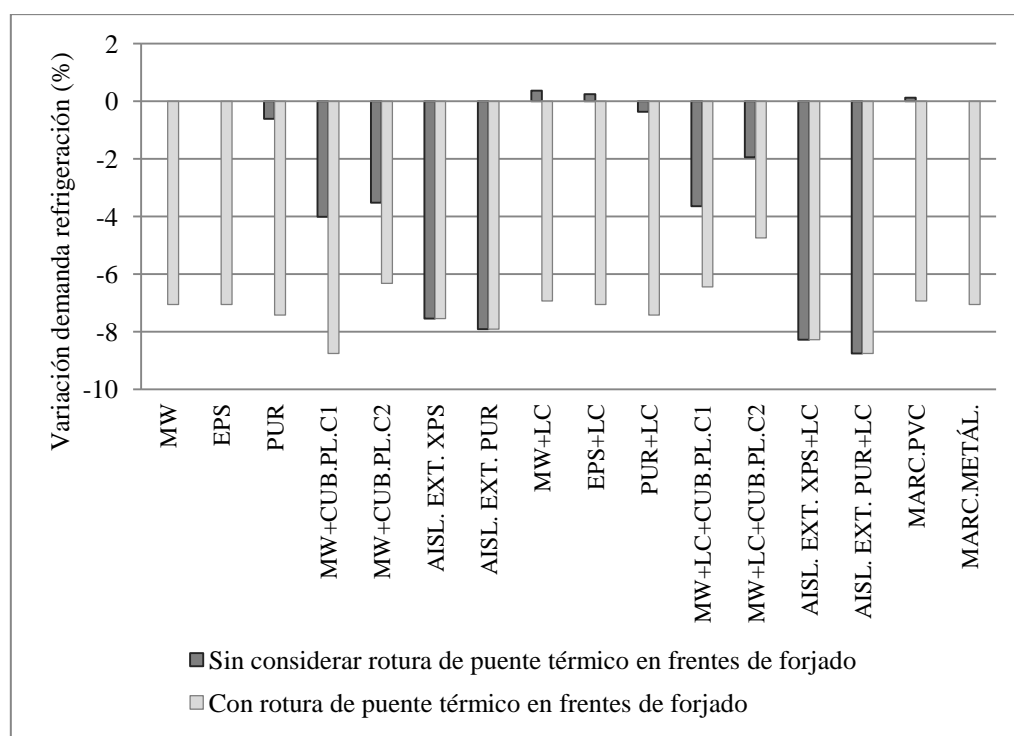


Figura 3.14. Variaciones en la demanda anual de refrigeración en los subescenarios de la vivienda entre medianeras con respecto al caso base₂.

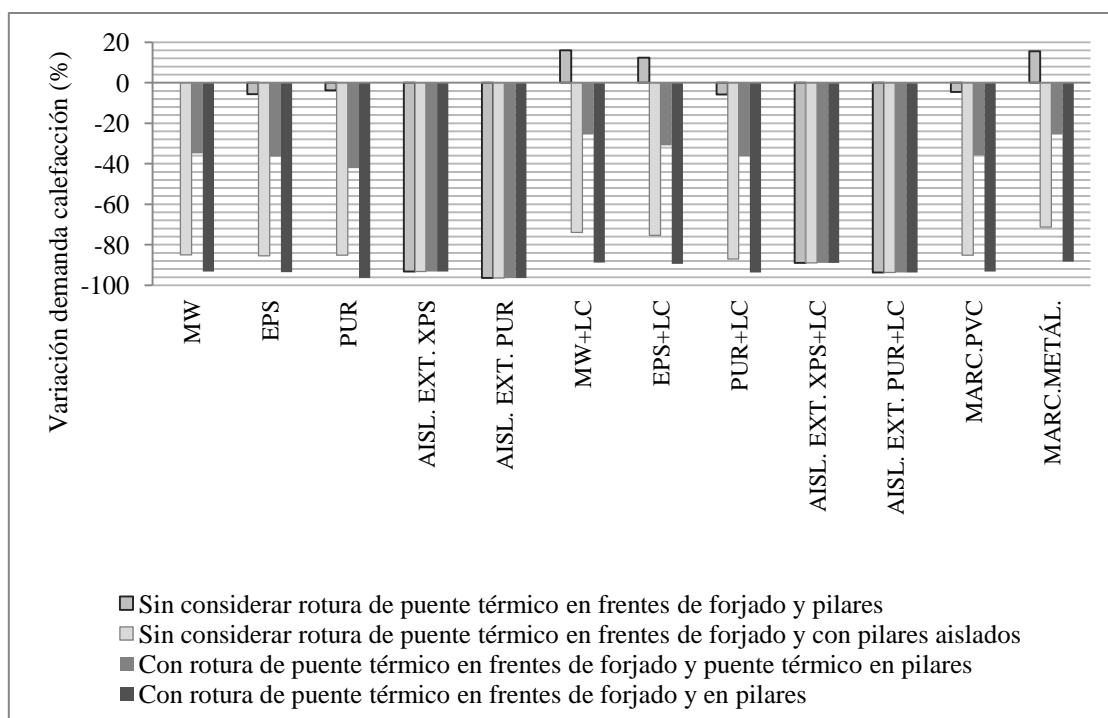


Figura 3.15. Variaciones en la demanda anual de calefacción en los subescenarios de la vivienda entre medianeras con respecto al caso base₃.

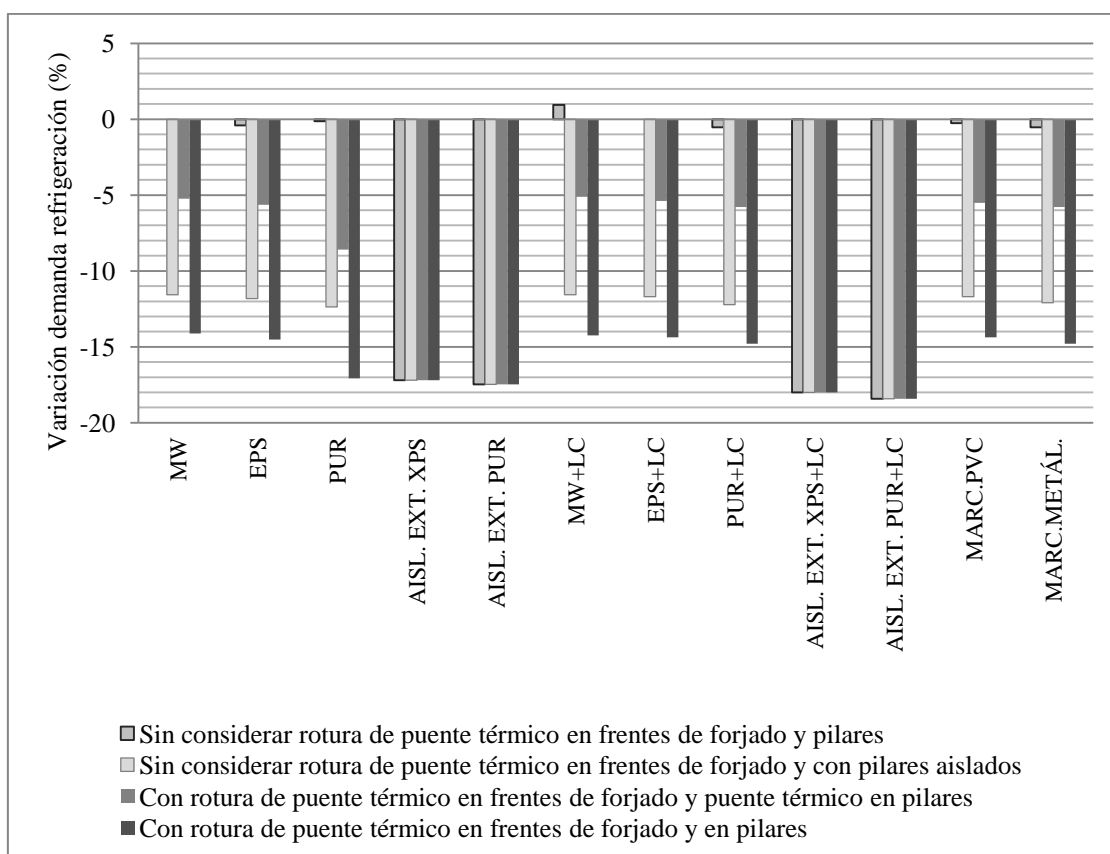


Figura 3.16. Variaciones en la demanda anual de refrigeración en los subescenarios de la vivienda entre medianeras con respecto al caso base₃.

Análisis de las variaciones de la IEE

En este apartado se va a llevar a cabo un análisis de las variaciones producidas en la IEE, llevando a cabo en el caso de estudio inicial las modificaciones evaluadas en el apartado anterior. En primer lugar, se han calculado los valores de IEE asociados a cada uno de los componentes de la vivienda que sufren modificaciones en cada uno de los subescenarios analizados. En las Tablas 3.26.- 3.41. se muestran dichos valores y los correspondientes a los materiales que componen cada uno de los elementos. Los resultados mostrados en dichas tablas se presentan por m² de superficie del elemento en cuestión, y se ha expresado con el superíndice “*”, para especificar que no se muestran en función de la superficie útil del edificio. En el caso de la cubierta inclinada C₀, se han incluido los tabiquillos palomeros y el resultado se presenta en función de la superficie horizontal, correspondiente a la superficie del forjado situado bajo la cámara de aire. En lo que se refiere a las fachadas, se observa que las diferencias entre los valores de sus IEE varían entre 2,9 kWh/m^{2*} y 67,07 kWh/m^{2*}, correspondiendo el mínimo valor a la sustitución del bloque de hormigón por ladrillo cerámico de ½ pie. En el caso de las fachadas F₀ y F₁, los bloques de hormigón suponen más del 60% del valor total de la IEE. En el caso de la fachada F₂, esta participación se reduce al 52%, debido al valor de IEE asociado al aislamiento de poliuretano (PUR). El mortero de cemento y el yeso presentan participaciones próximas al 2% en todos los casos. Se observa que las diferencias en el valor de IEE de las fachadas proceden fundamentalmente del tipo de aislamiento utilizado. La participación de la lana mineral (MW), por ejemplo, está próxima al 8% en las fachadas F₀ y F_{0LC}. En lo que respecta al resto de los aislamientos considerados, su participación al valor de IEE de las fachadas es del 16% en el caso del poliestireno expandido (EPS), del 28% en el caso del poliuretano proyectado, del 42% en el caso del poliestireno extruido (XPS) y del 34% en el caso de los paneles rígidos de poliuretano (PUR). El aislamiento de lana mineral muestra un valor de IEE de 17,5 kWh/m^{2*}, mientras que el valor asociado al poliestireno extruido (XPS) es de cerca de 120 kWh/m^{2*}. En el caso de las cubiertas evaluadas, el mayor valor de IEE se haya asociado a la cubierta inclinada C₀, presente en el caso de estudio inicial. Sin embargo, las dos cubiertas planas transitables consideradas muestran un valor de IEE similar, con una diferencia que se encuentra por debajo de 0,6 kWh/m^{2*}. En el caso de la cubierta inclinada C₀, el cerramiento inclinado con acabado de teja supone un 23% del valor total de IEE, la participación del forjado bajo la cámara de aire y los tabiquillos conejeros está próxima al 70% y al 7%, respectivamente. La losa alveolar presente en el forjado supone un 56% del valor total de IEE para toda la cubierta. Las medianeras presentan un valor de IEE que difiere del obtenido para las fachadas entre 35,12 kWh/m^{2*} y 102,19 kWh/m^{2*}. Los valores de la IEE se muestran en términos de energía primaria por m² de superficie útil.

Tabla 3.26. Valor de IEE de la fachada F₀ y de cada uno de sus componentes.

Fachada F₀	IEE (MJ/m^{2*})	IEE (kWh/m^{2*})
Mortero de cemento	19,45	5,40
BH perforado áridos ligeros	529,82	147,17
Lana mineral (MW)	63,00	17,50
Tabicón de LH doble	161,70	44,92

Enlucido de yeso	19,22	5,34
Total	793,19	220,33

m²*: por superficie de fachada.

Fuente: [80].

Tabla 3.27. Valor de IEE de la fachada F₁ y de cada uno de sus componentes.

Fachada F₁	IEE (MJ/m ² *)	IEE (kWh/m ² *)
Mortero de cemento	19,45	5,40
BH perforado áridos ligeros	529,82	147,17
Poliestireno expandido (EPS)	140,40	39,00
Tabicón de LH doble	161,70	44,92
Enlucido de yeso	19,22	5,34
Total	870,59	241,83

m²*: por superficie de fachada.

Fuente: [80].

Tabla 3.28. Valor de IEE de la fachada F₂ y de cada uno de sus componentes.

Fachada F₂	IEE (MJ/m ² *)	IEE (kWh/m ² *)
Mortero de cemento	19,45	5,40
BH perforado áridos ligeros	529,82	147,17
Poliuretano proyectado (PUR)	294,00	81,67
Tabicón de LH doble	161,70	44,92
Enlucido de yeso	19,22	5,34
Total	1024,19	284,50

m²*: por superficie de fachada.

Fuente: [80].

Tabla 3.29. Valor de IEE de la fachada F₃ y de cada uno de sus componentes.

Fachada F₃	IEE (MJ/m ² *)	IEE (kWh/m ² *)
Mortero de cemento	19,45	5,40
Poliestireno extruido (XPS)	421,20	117,00
BH perforado áridos ligeros	529,82	147,17
Enlucido de yeso	19,22	5,34
Total	989,69	274,91

m²*: por superficie de fachada.

Fuente: [80].

Tabla 3.30. Valor de IEE de la fachada F₄ y de cada uno de sus componentes.

Fachada F₄	IEE (MJ/m ² *)	IEE (kWh/m ² *)
Mortero de cemento	19,45	5,40
Espuma rígida de poliuretano (PUR)	294,00	81,66
BH perforado áridos ligeros	529,82	147,17
Enlucido de yeso	19,22	5,34
Total	862,49	239,57

m²*: por superficie de fachada.

Fuente: [80].

Tabla 3.31. Valor de IEE de la fachada F_{0LC} y de cada uno de sus componentes.

Fachada F_{0LC}	IEE (MJ/m ^{2*})	IEE (kWh/m ^{2*})
Mortero de cemento	19,45	5,40
Ladrillo macizo cerámico de 1/2 pie	540,26	150,07
Lana mineral (MW)	63,00	17,50
Tabicón de LH doble	161,70	44,92
Enlucido de yeso	19,22	5,34
Total	803,63	223,23

m^{2*}: por superficie de fachada.

Fuente: [80].

Tabla 3.32. Valor de IEE de la fachada F_{1LC} y de cada uno de sus componentes.

Fachada F_{1LC}	IEE (MJ/m ^{2*})	IEE (kWh/m ^{2*})
Mortero de cemento	19,45	5,40
Ladrillo macizo cerámico de 1/2 pie	540,26	150,07
Poliestireno expandido (EPS)	140,40	39,00
Tabicón de LH doble	161,70	44,92
Enlucido de yeso	19,22	5,34
Total	881,03	244,73

m^{2*}: por superficie de fachada.

Fuente: [80].

Tabla 3.33. Valor de IEE de la fachada F_{2LC} y de cada uno de sus componentes.

Fachada F_{2LC}	IEE (MJ/m ^{2*})	IEE (kWh/m ^{2*})
Mortero de cemento	19,45	5,40
Ladrillo macizo cerámico de 1/2 pie	540,26	150,07
Poliuretano proyectado (PUR)	294,00	81,67
Tabicón de LH doble	161,70	44,92
Enlucido de yeso	19,22	5,34
Total	1034,63	287,40

m^{2*}: por superficie de fachada.

Fuente: [80].

Tabla 3.34. Valor de IEE de la fachada F_{3LC} y de cada uno de sus componentes.

Fachada F_{3LC}	IEE (MJ/m ^{2*})	IEE (kWh/m ^{2*})
Mortero de cemento	19,45	5,40
Poliestireno extruido (XPS)	421,20	117,00
Ladrillo macizo cerámico de 1/2 pie	540,26	150,07
Enlucido de yeso	19,22	5,34
Total	1000,13	277,81

m^{2*}: por superficie de fachada.

Fuente: [80].

Tabla 3.35. Valor de IEE de la fachada F_{4LC} y de cada uno de sus componentes.

Fachada F_{4LC}	IEE (MJ/m ^{2*})	IEE (kWh/m ^{2*})
--------------------------------	---------------------------	----------------------------

Mortero de cemento	19,45	5,40
Espuma rígida de poliuretano (PUR)	294,00	81,66
Ladrillo macizo cerámico de 1/2 pie	540,26	150,07
Enlucido de yeso	19,22	5,34
Total	872,93	242,47

m2*: por superficie de fachada.

Fuente: [80].

Tabla 3.36. Valor de IEE de las medianeras y de cada uno de sus componentes.

Medianeras	IEE (MJ/m ^{2*})	IEE (kWh/m ^{2*})
Enlucido de yeso	19,22	5,34
BH perforado áridos ligeros	529,82	147,17
Lana mineral (MW)	63,00	17,50
BH perforado áridos ligeros	529,82	147,17
Enlucido de yeso	19,22	5,34
Total	1161,08	322,52

m2*: por superficie de cerramiento.

Fuente: [80].

Tabla 3.37. Valor de IEE de la cubierta inclinada C₀ y de cada uno de sus componentes.

Cubierta inclinada C ₀	IEE (MJ/m ^{2*})	IEE (kWh/m ^{2**})
Teja de arcilla cocida	146,49	40,69
Cámara de aire ligeramente ventilada	-	-
Mortero de cemento ²	80,64	22,40
Lámina geotextil	5,93	1,65
Lámina de PVC	164,51	45,70
Rasilla cerámica	92,38	25,66
Tabiquillos conejeros	140,21	38,95
Poliestireno extruido XPS	210,60	58,50
Losa alveolar canto con capa compresión	1172,74	325,76
Cámara de aire sin ventilar horiz.	-	-
Placa yeso laminado	72,21	20,06
Total	2085,71	579,36

m2*: por superficie horizontal.

Fuente: [80].

Tabla 3.38. Valor de IEE de la cubierta plana convencional C₁ y de cada uno de sus componentes.

Cubierta plana convencional C ₁	IEE (MJ/m ^{2*})	IEE (kWh/m ^{2*})
Baldosa cerámica	78,77	21,88
Mortero de cemento	9,22	2,56
Lámina geotextil	5,93	1,65
Lámina de PVC	164,51	45,70
Lámina geotextil	5,93	1,65
Poliestireno expandido	153,56	42,66
Lámina de polietileno	95,88	26,63
Hormigón en masa	91,58	25,44

Losa alveolar con capa de compresión	1172,74	325,76
Cámara de aire sin ventilar	-	-
Placa de yeso laminado	72,21	20,06
Total	1850,34	513,98

m²*: por superficie de cerramiento. Fuente: [80].

Tabla 3.39. Valor de IEE de la cubierta plana invertida C₂ y de cada uno de sus componentes.

Cubierta plana invertida C ₂	IEE (MJ/m ² *)	IEE (kWh/m ² *)
Baldosa de hormigón filtrante	335,31	93,14
Lámina geotextil	5,93	1,65
Lámina de PVC	164,51	45,70
Lámina geotextil	5,93	1,65
Hormigón en masa	91,58	25,44
Losa alveolar con capa de compresión	1172,74	325,76
Cámara de aire sin ventilar	-	-
Placa de yeso laminado	72,21	20,06
Total	1848,21	513,39

m²*: por superficie de cerramiento. Fuente: [80].

Tabla 3.40. Valor de IEE de los forjados interiores y de cada uno de sus componentes.

Forjado interior	IEE (MJ/m ² *)	IEE (kWh/m ² *)
Baldosa cerámica	40,83	11,34
Mortero de cemento	58,37	16,21
Losa alveolar con capa compresión	1172,74	325,76
Cámara de aire sin ventilar horiz.	-	-
Placa yeso laminado	72,21	20,06
Total	1344,15	373,37

m²*: por superficie de partición interior. Fuente: [80].

Tabla 3.41. Valor de IEE de los suelos en contacto con el terreno y de cada uno de sus componentes.

Suelo en contacto con el terreno	IEE (MJ/m ² *)	IEE (kWh/m ² *)
Baldosa cerámica	40,83	11,34
Hormigón de nivelación	97,48	27,08
Lámina geotextil	5,93	1,65
Lana mineral (MW)	63,00	17,50
Lámina geotextil	5,93	1,65
Hormigón armado	110,89	30,80
Gravas	33,33	9,26
Total	357,39	99,28

m²*: por superficie de suelo. Fuente: [80].

Una vez calculados los valores de IEE para cada uno de los elementos modificados en los diferentes subescenarios, se ha llevado a cabo una evaluación de su contribución en el edificio, teniendo en cuenta su superficie total. El objetivo de este análisis es el de obtener las variaciones de IEE producidas en cada subescenario con respecto al caso de estudio inicial. Los resultados han sido expresados en función de la superficie útil de la vivienda. En el caso de la vivienda aislada, evaluando los diferentes subescenarios se observan reducciones de la IEE hasta -50 kWh/m^2 e incrementos de hasta 201 kWh/m^2 . Los mayores incrementos se observan al sustituir los marcos de madera de las ventanas por marcos de aluminio lacados seguidos de su sustitución por marcos de PVC. De la Tabla 3.31 a la Tabla 3.35 se ha observado que la sustitución del bloque de hormigón por ladrillo cerámico en las fachadas producía incrementos pequeños en el valor de la IEE. Sin embargo, al evaluar las variaciones de la IEE en el edificio completo, se ha observado que se producen reducciones al tener en cuenta esta modificación. Tal como ya se comentó en el apartado de Metodología de este capítulo, la superficie útil del edificio se ha mantenido invariable en todos los subescenarios evaluados, por tanto las fachadas que presentan un menor espesor provocan una reducción en la superficie del forjado de losa alveolar, de elevada IEE, reduciendo por tanto el valor global de IEE del edificio. El mismo razonamiento es aplicable a las fachadas con aislamiento de poliestireno extruido (XPS). La modificación de la tipología de vivienda, de una vivienda aislada a vivienda entre medianeras, muestra variaciones de la IEE situadas entre -90 kWh/m^2 y 104 kWh/m^2 . Aunque en esta última tipología de vivienda únicamente se ha computado una de las medianeras en los cálculos, se observa que cuatro de los subescenarios muestran incrementos de la IEE al compararlos con el caso base₁, correspondiente al caso de estudio inicial. Estos subescenarios se corresponden con aquellos en los que se han sustituido los marcos de madera de las ventanas por marcos de aluminio lacado o PVC, y aquellos en que se ha utilizado aislamiento intermedio de poliuretano o aislamiento exterior de poliestireno extruido. En la modificación de la tipología de vivienda aislada a vivienda en bloque, se observa que en todos los subescenarios evaluados se produce una reducción del valor de IEE (entre -1 kWh/m^2 y -85 kWh/m^2), excepto en el subescenario de sustitución de los marcos del caso inicial por marcos de aluminio lacado, en el que se observa un incremento.

En el caso de la vivienda aislada, el aislamiento de los puentes térmicos en los frentes de forjado muestra incrementos en el valor de IEE comprendidos entre $1,4 \text{ kWh/m}^2$ y $13,44 \text{ kWh/m}^2$, correspondiendo este último valor al subescenario en que se ha modificado el aislamiento de lana mineral de la fachada F_0 por poliuretano. Las variaciones observadas en el caso de la vivienda entre medianeras se sitúan entre $1,54 \text{ kWh/m}^2$ y $7,17 \text{ kWh/m}^2$. En el caso de la vivienda en bloque (dúplex), el aislamiento de los frentes de forjado provoca variaciones situadas entre $0,77 \text{ kWh/m}^2$ y $3,59 \text{ kWh/m}^2$. La variación de este último intervalo con respecto a la vivienda entre medianeras viene provocada por la presencia, en el dúplex, de balcones y pasarelas de acceso, cuyo aislamiento no ha sido tenido en cuenta a la hora de proponer la rotura del puente térmico en frentes de forjado. En este último caso, se ha analizado además el incremento en la IEE provocada por el aislamiento de los pilares en aquellos subescenarios en que fuera necesario. Dicho incremento varía entre $0,96 \text{ kWh/m}^2$ y $4,48 \text{ kWh/m}^2$ para todos los subescenarios evaluados en esta tipología de vivienda.

Consumo energético versus energía cautiva (IEE)

En la última parte del análisis, se ha llevado a cabo una estimación del consumo de energía primaria de la vivienda a partir de la definición de tres sistemas de climatización (ver Tabla 3.23.), los valores de demanda energética obtenidos para cada subescenario y los factores de conversión a energía primaria expuestos en el apartado de Metodología.

A partir de los resultados obtenidos se observa que la sustitución del sistema de climatización A por el sistema C, supone una reducción en el consumo de energía primaria para calefacción del 35% y para refrigeración del 33%. Al considerar la modificación de una vivienda aislada a una entre medianeras, el consumo de calefacción se reduce entre 7,38 kWh/m²año y 12,15 kWh/m²año y el de refrigeración entre 8,8 kWh/m²año y 11,05 kWh/m²año. Al pasar de una vivienda aislada a una vivienda en bloque (dúplex) la reducción en el consumo de calefacción se halla entre 11,96 kWh/m²año y 28,16 kWh/m²year, y en refrigeración entre 14,11 kWh/m²año y 50,81 kWh/m²año. En la Tabla 3.42., se muestran las reducciones máximas y mínimas obtenidas para el consumo de energía primaria anual al considerar la rotura del puente térmico en los frentes de forjado. A partir de dichos resultados se observa que a medida que se eligen sistemas con una mayor eficiencia energética las diferencias obtenidas son menos relevantes. Se observa además que al considerar la rotura del puente térmico en los pilares, en el caso de la vivienda en bloque, la reducción máxima obtenida para el consumo de energía primaria anual es inferior a 1,1 kWh/m²año. Las reducciones en el consumo de refrigeración son inferiores a 1,45 kWh/m²año para todos los casos analizados.

Tabla 3.42. Intervalo de variación del consumo de energía primaria por m² de superficie útil al considerar la rotura del puente térmico en frentes de forjado.

		Variación consumo de energía primaria (kWh/m ²)							
		Vivienda aislada		Vivienda entre medianeras		Vivienda en bloque			
		Var. Mín.	Var. Máx.	Var. Mín.	Var. Máx.	Pilares no aislados		Pilares aislados	
		Var. Mín.	Var. Máx.	Var. Mín.	Var. Máx.	Var. Mín.	Var. Máx.	Var. Mín.	Var. Máx.
Sistema A ($\eta=0,85$; EER=2)	Calefacción	-4,06	-7,45	-1,96	-4,17	-1,89	-2,68	-0,42	-1,06
	Refrigeración	-0,79	-1,45	-0,36	-0,95	-0,62	-0,99	-0,30	-0,55
Sistema B ($\eta=1,05$; EER=2,5)	Calefacción	-3,32	-6,10	-1,60	-3,41	-1,55	-2,20	-0,34	-0,86
	Refrigeración	-0,63	-1,16	-0,29	-0,76	-0,49	-0,79	-0,24	-0,44
Sistema C (COP=3,5; EER=3)	Calefacción	-2,63	-4,83	-1,27	-2,70	-1,23	-1,74	-0,27	-0,68
	Refrigeración	-0,53	-0,97	-0,24	-0,63	-0,41	-0,66	-0,20	-0,37

*Abreviaturas utilizadas en la Tabla: Var. Mín.: variación mínima; Var. Máx.: variación máxima.

Los resultados obtenidos para la comparación de la IEE y el consumo de energía primaria para calefacción y refrigeración se muestran en las Figuras 3.17.- 3.24. Hay que tener en cuenta que las variaciones han sido calculadas en cada caso con respecto al caso de estudio inicial, correspondiente al caso base₁ de la vivienda aislada, y que el mismo sistema de climatización ha sido considerado en los subescenarios comparados. A partir de estos resultados obtenidos, se observa en el caso de la vivienda aislada que la sustitución de los marcos de madera del caso de estudio inicial por marcos de aluminio lacado provoca incrementos tanto en la IEE como en el consumo de calefacción. En el primer caso, este incremento se aproxima a 200 kWh/m², mientras que en el segundo caso, se halla situado entre 50 kWh/m² y 76 kWh/m². En el caso de utilizar poliuretano como aislamiento interior en las fachadas, se observa que el incremento obtenido en la IEE (próximo a 100 kWh/m²) es mayor que la reducción obtenida para el consumo de calefacción (entre -29 kWh/m² y -99 kWh/m²), especialmente cuanto mayor es la eficiencia del sistema energético. Al considerar la rotura del puente térmico en frentes de forjado, se observan reducciones significantes en el consumo energético, mientras que las variaciones de la IEE son pequeñas. En el caso del consumo de refrigeración las máximas reducciones observadas se hallan situadas entre -26 kWh/m² and -72 kWh/m², para los tres sistemas de climatización. En lo referente al consumo de calefacción, las reducciones se hacen más relevantes: en el caso del Sistema A, éstas se sitúan entre -203 kWh/m² y -373 kWh/m²; en el caso del Sistema B, entre -166 kWh/m² a -305 kWh/m²; y en el caso del Sistema C, entre -131 kWh/m² y -241 kWh/m².

En el caso de la vivienda entre medianeras, se observan reducciones en el consumo energético importantes, con respecto a la vivienda aislada. Las reducciones son mayores cuando se consideran sistemas con una menor eficiencia energética. El uso de aislamiento exterior en las fachadas, de poliestireno extruido o poliuretano, muestra reducciones considerables en el consumo energético, con pequeños incrementos en el valor de la IEE. La reducción de la superficie de ventanas en la vivienda entre medianeras provoca que los marcos de aluminio lacado de las ventanas muestren una menor participación sobre los valores de IEE. En este caso concreto, la utilización de este tipo de marcos provoca incrementos de la IEE próximos a 102 kWh/m², mientras que el consumo de calefacción se ve reducido en -505 kWh/m², -413 kWh/m² y -328 kWh/m², para los Sistemas A, B y C, respectivamente. En el caso de la vivienda en bloque, las reducciones obtenidas para el consumo de calefacción superan los 1000 kWh/m², si se considera un tiempo de vida de 50 años para el edificio. Tal como se observó en la primera parte del análisis los valores de demanda energética, eran muy inferiores en el caso de esta tipología de vivienda. Uno de los requisitos establecidos en el estudio, era la no modificación de las características constructivas de la vivienda para poder llevar a cabo la comparación. Debido a ello, no se ha visto modificado en ningún caso el espesor de aislamiento utilizado en las fachadas, hecho que influye en los resultados, más especialmente en este caso concreto en que las necesidades energéticas se ven reducidas. Las reducciones máximas obtenidas para el consumo de refrigeración se sitúan cerca de -472 kWh/m². En el caso del consumo de calefacción, las máximas reducciones no superan los -660 kWh/m² si se considera el Sistema C en la vivienda.

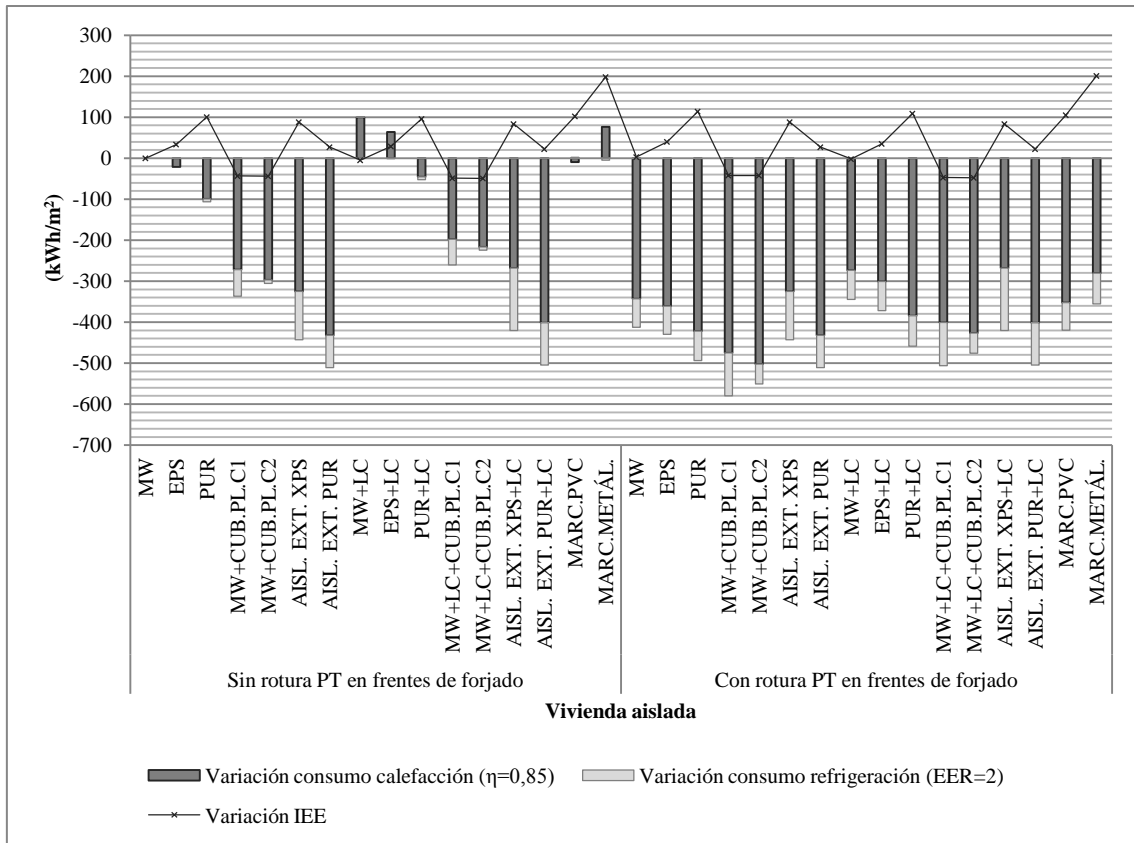


Figura 3.17. Variación de la IEE y del consumo de energía primaria para calefacción y refrigeración considerando el Sistema A en todos los subescenarios de la vivienda aislada para un tiempo de vida de 50 años.

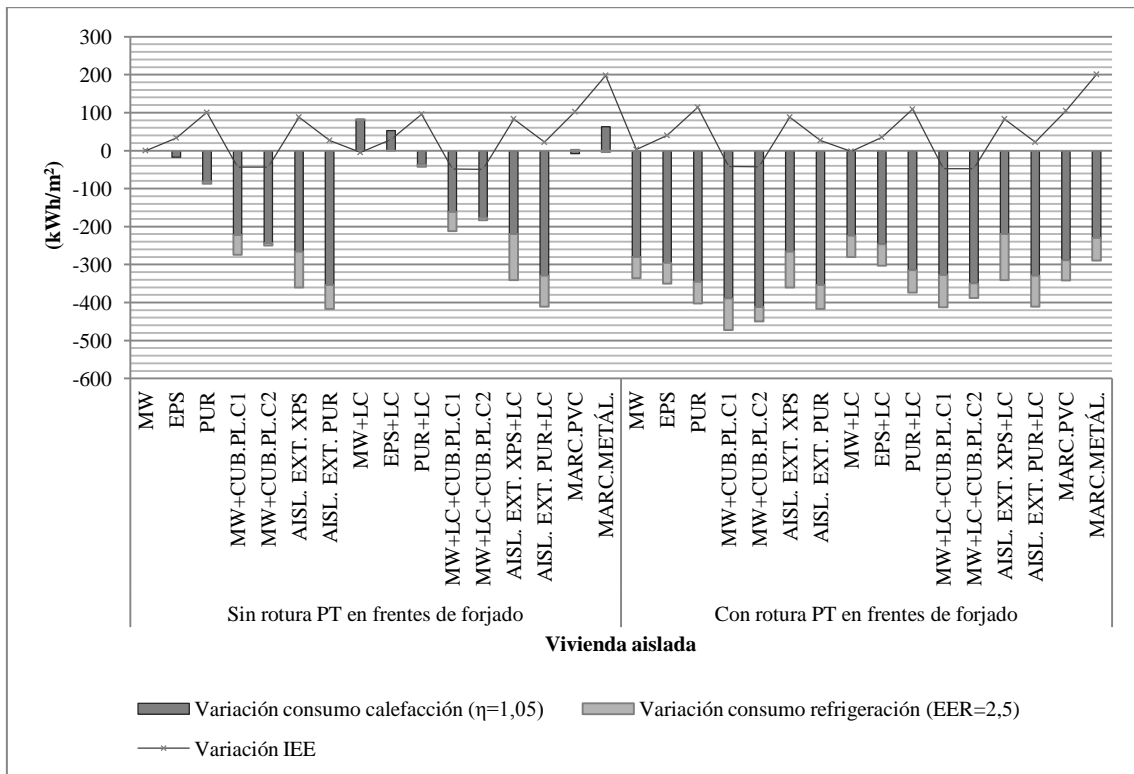


Figura 3.18. Variación de la IEE y del consumo de energía primaria para calefacción y refrigeración considerando el Sistema B en todos los subescenarios de la vivienda aislada para un tiempo de vida de 50 años.

Figura 3.19. Variación de la IEE y del consumo de energía primaria para calefacción y refrigeración considerando el Sistema C en todos los subescenarios de la vivienda aislada para un tiempo de vida de 50 años.

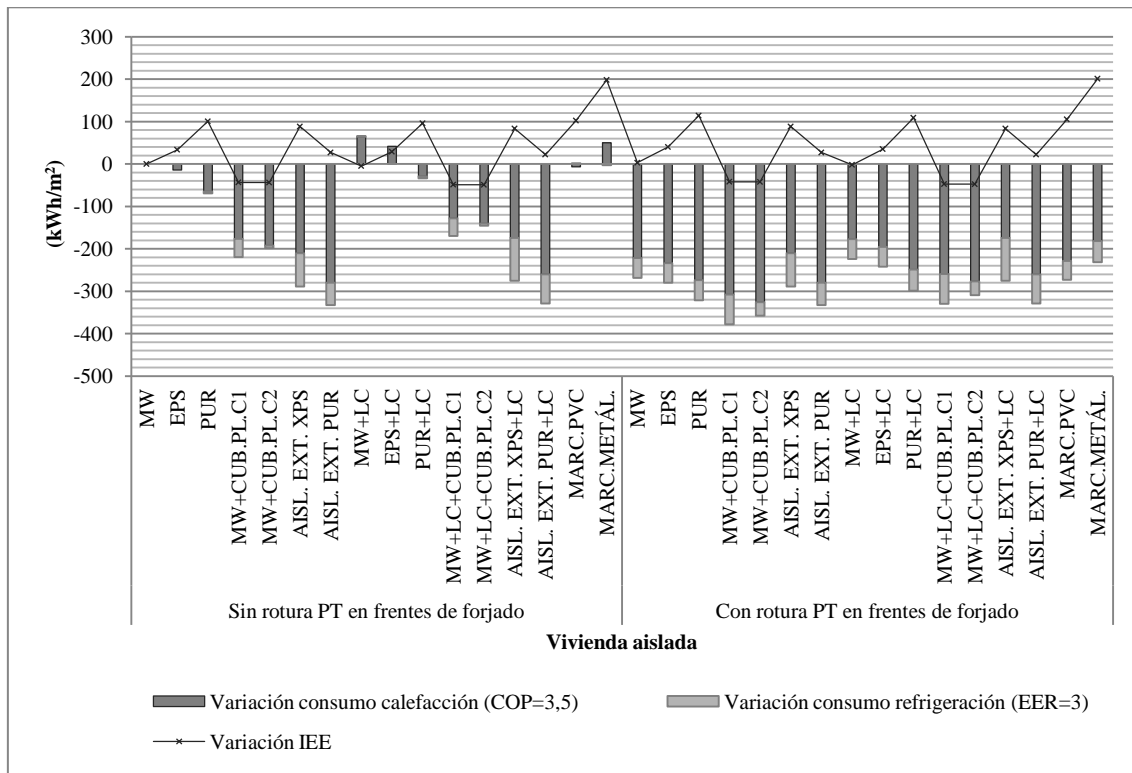


Figura 3.19. Variación de la IEE y del consumo de energía primaria para calefacción y refrigeración considerando el Sistema C en todos los subescenarios de la vivienda aislada para un tiempo de vida de 50 años.

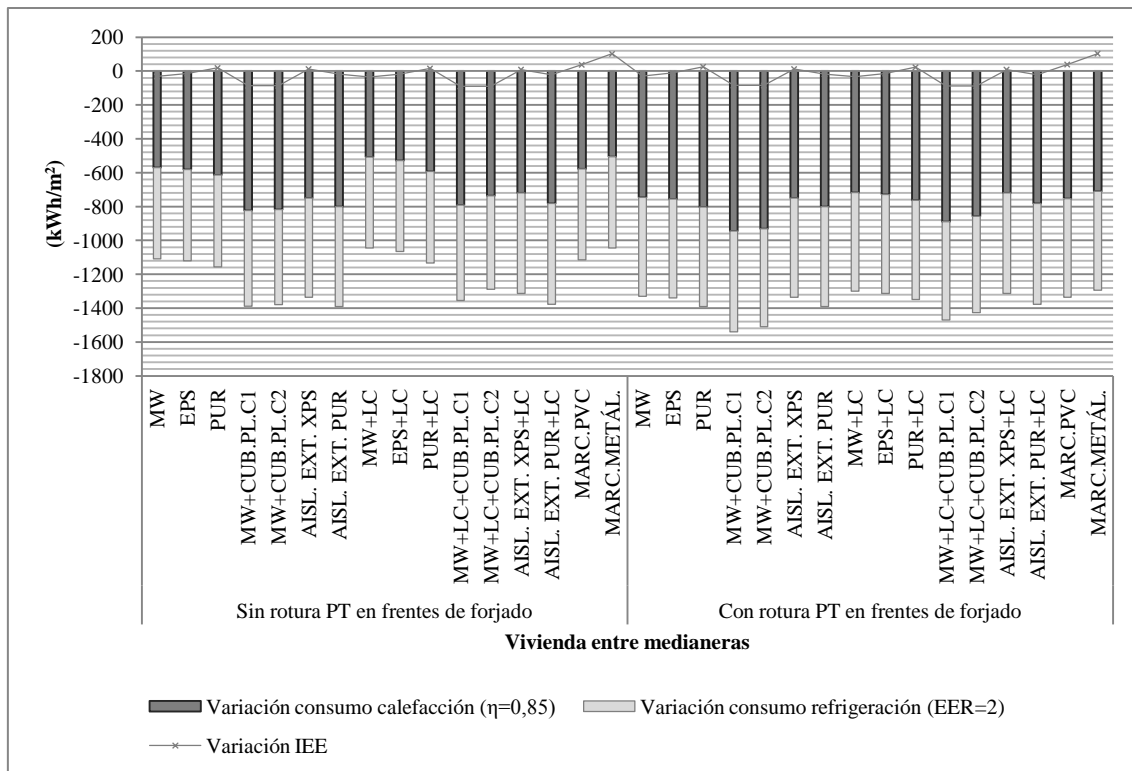


Figura 3.20. Variación de la IEE y del consumo de energía primaria para calefacción y refrigeración considerando el Sistema A en todos los subescenarios de la vivienda entre medianeras para un tiempo de vida de 50 años.

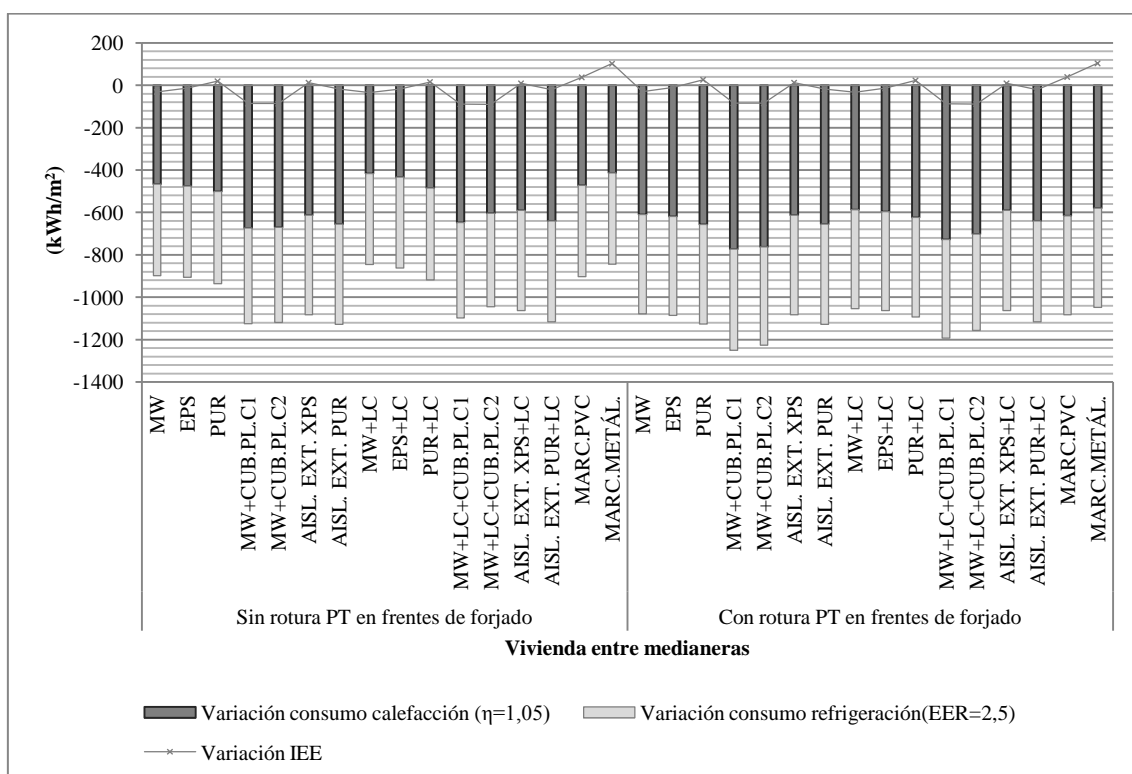


Figura 3.21. Variación de la IEE y del consumo de energía primaria para calefacción y refrigeración considerando el Sistema B en todos los subescenarios de la vivienda entre medianeras para un tiempo de vida de 50 años.

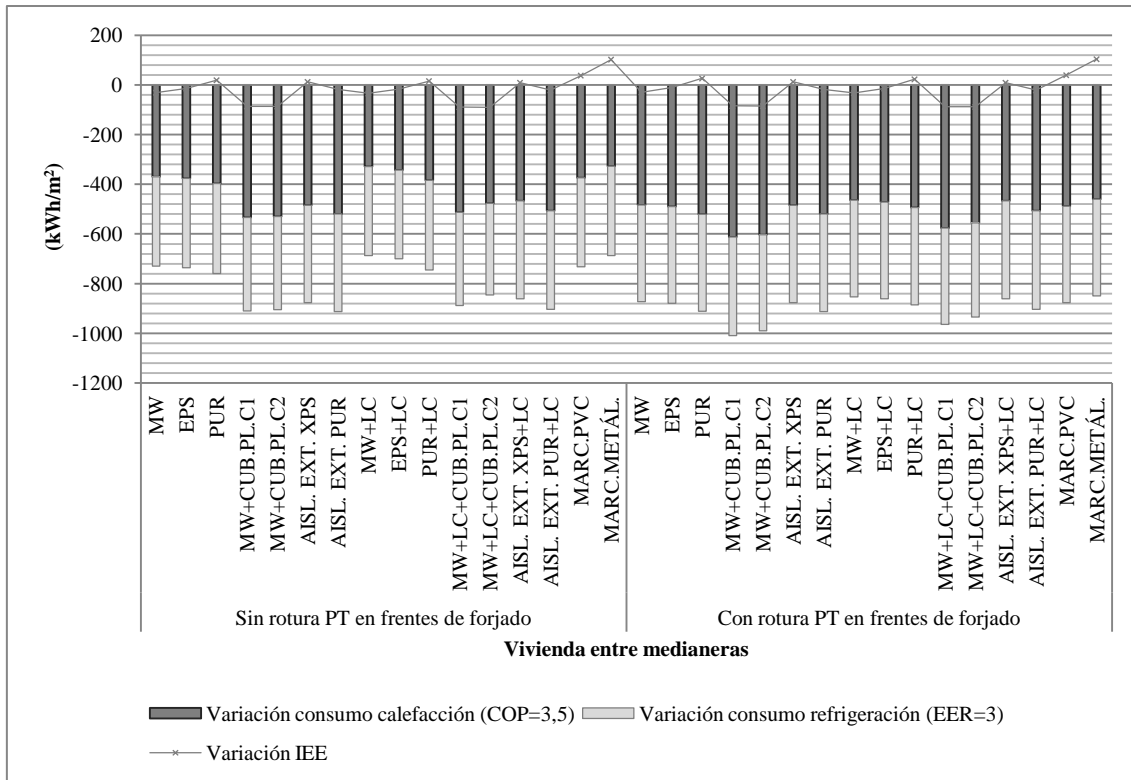


Figura 3.22. Variación de la IEE y del consumo de energía primaria para calefacción y refrigeración considerando el Sistema C en todos los subescenarios de la vivienda entre medianeras para un tiempo de vida de 50 años.

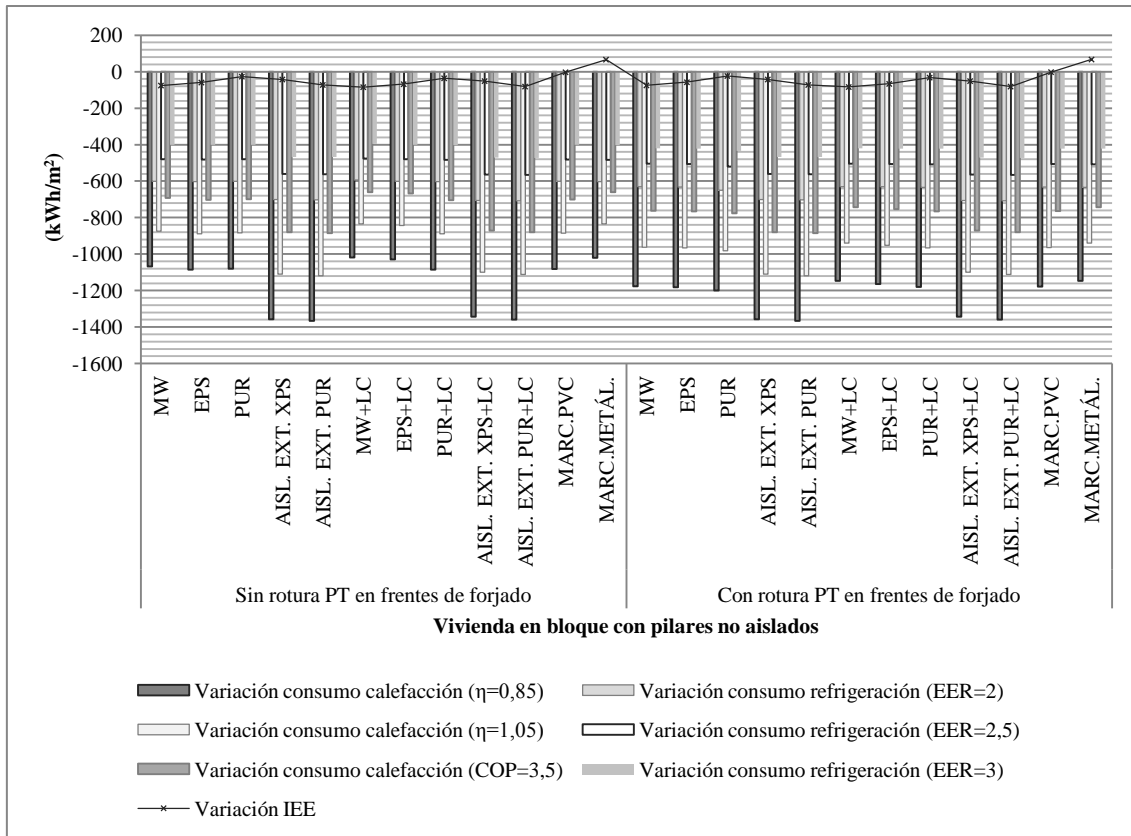


Figura 3.23. Variación de la IEE y del consumo de energía primaria para calefacción y refrigeración considerando los Sistema A, B y C en todos los subescenarios de la vivienda en bloque con pilares no aislados para un tiempo de vida de 50 años.

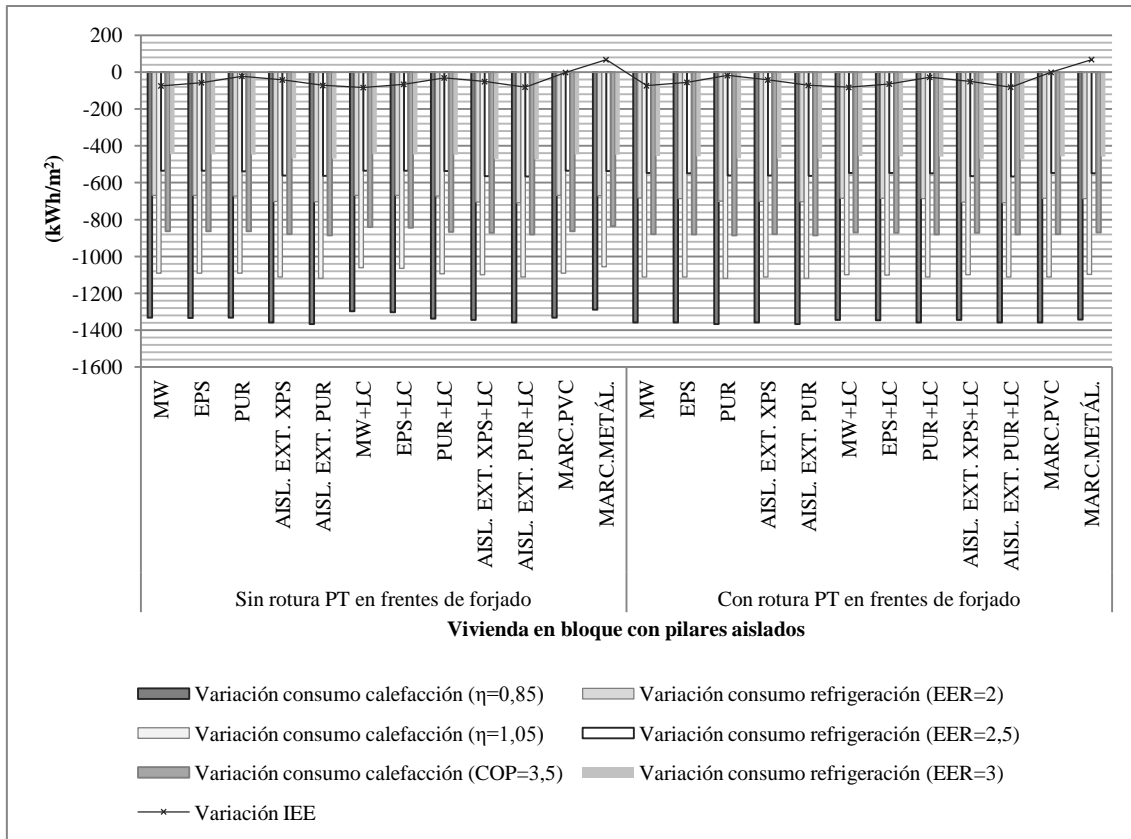


Figura 3.24. Variación de la IEE y del consumo energético considerando los Sistemas A, B y C en todos los subescenarios de la vivienda en bloque con pilares aislados para un tiempo de vida de 50 años.

Capítulo 4. Análisis de puentes térmicos lineales de encuentro de frentes de forjado con fachadas.

Objetivos

El objetivo fundamental de este capítulo es el de observar el error producido en el análisis de la demanda energética anual del Capítulo 3, al utilizar los valores de catálogo para la transmitancia térmica lineal $\psi \left(\frac{W}{mK}\right)$, en los encuentros de frentes de forjado con fachadas.

Metodología

En este capítulo, se ha llevado a cabo el cálculo de la conductividad térmica lineal $\psi \left(\frac{W}{mK}\right)$ y el factor de temperatura superficial, f_{Rsi} , que caracterizan los puentes térmicos de encuentro de frentes de forjado con fachadas presentes en las viviendas analizadas en el Capítulo 3. Los subescenarios considerados para llevar a cabo el análisis son aquellos en los que se producía una modificación en la composición de las fachadas. Para realizar el análisis se ha hecho uso del programa THERM 7.3. [85], descrito en la sección de Metodología general de la Tesis. Para la definición de los puentes térmicos se ha seguido el procedimiento descrito en [86], [122] basado en la Norma ISO 10211 [123].

Un puente térmico se produce por una variación de la resistencia térmica, debida a cambios en los materiales o encuentros entre cerramientos. La clasificación hecha en el CTE [16] distingue entre puentes térmicos integrados en los cerramientos, puentes térmicos formados por encuentro de cerramientos, esquinas, encuentros de voladizos con fachadas y encuentros de cerramientos exteriores con tabiquería interior [120]. La caracterización de los puentes térmicos se lleva a cabo a partir de la transmitancia térmica lineal o puntual y del factor de resistencia superficial interior, f_{Rsi} . La transmitancia térmica lineal $\psi \left(\frac{W}{mK}\right)$ proporciona la transferencia térmica adicional en un puente térmico lineal [120], en el cual el flujo de calor es bidimensional. El factor de resistencia superficial interior, f_{Rsi} , conocido también como factor de temperatura de la superficie interior, es un factor adimensional y proporciona información acerca del riesgo de formación de condensaciones en un puente térmico. Se define como el cociente entre la diferencia de la temperatura superficial interior y la temperatura exterior, y la diferencia entre la temperatura del espacio interior y la temperatura exterior [124].

El flujo de calor a través de la envolvente térmica de un edificio, si se tiene en cuenta el efecto de los puentes térmicos, se expresa como se describe en la Ecuación 4-1 [120].

Ecuación 4-1. Flujo de calor a través de la envolvente térmica.

$$\phi_T(W) = \left(\sum U_j \left(\frac{W}{m^2K} \right) A_j(m^2) + \sum \psi_k \left(\frac{W}{mK} \right) L_k(m) + \sum X_l \left(\frac{W}{K} \right) \right) (\theta_i(K) - \theta_e(K))$$

(Fuente: [120])

donde,

$\phi_T(W)$: es el flujo de calor total por conducción a través de la envolvente térmica.

$\sum U_j \left(\frac{W}{m^2K} \right) A_j(m^2)$: es la transmisión de calor a través de los elementos constructivos homogéneos de la envolvente térmica. $U_j \left(\frac{W}{m^2K} \right)$ es la transmitancia térmica del elemento constructivo y $A_j(m^2)$, su superficie.

$\sum \psi_k \left(\frac{W}{mK} \right) L_k(m)$: es la transmisión de calor a través de los puentes térmicos lineales. $\psi_k \left(\frac{W}{mK} \right)$ es la transmitancia térmica lineal del puente térmico lineal k , y $L_k(m)$, su longitud.

$\sum X_l \left(\frac{W}{K} \right)$: es la transmisión de calor a través de los puentes térmicos puntuales. $X_l \left(\frac{W}{K} \right)$ es la transmitancia térmica puntual del puente térmico puntual l .

$\theta_i(K) - \theta_e(K)$: es la diferencia de temperaturas entre los ambientes interior y exterior al edificio.

La contribución de los puentes térmicos puntuales se considera despreciable [120] y el flujo de calor viene dado por la transmisión de calor a través de los elementos homogéneos y de los puentes térmicos lineales. La transmitancia térmica lineal $\psi \left(\frac{W}{mK} \right)$ puede ser expresada, entonces, como se indica en la Ecuación 4-2.

Ecuación 4-2. Transmitancia térmica lineal.

$$\psi \left(\frac{W}{mK} \right) = L^{2D} \left(\frac{W}{mK} \right) - \sum \left(U_i \left(\frac{W}{m^2K} \right) \cdot L_i(m) \right)$$

(Fuente: [86])

donde,

$L^{2D} \left(\frac{W}{mK} \right)$: es el coeficiente de acoplamiento térmico lineal a través de la envolvente térmica del edifici.

$L_i(m)$: es la longitud del modelo sobre la cual se aplica el valor $U_i \left(\frac{W}{m^2K} \right)$.

A la hora de modelizar un puente térmico lineal, se deben establecer los planos de corte que delimitan el sistema a evaluar y las dimensiones utilizadas (sistema dimensional). En lo que se refiere al sistema dimensional se puede distinguir entre sistema dimensional exterior, interior o totalmente interior, en función de si las longitudes son tomadas desde el exterior, desde el interior incluyendo el espesor de las particiones interiores o desde el interior excluyendo el espesor de las particiones interiores, respectivamente. Los subíndices utilizados para expresar el sistema dimensional utilizado son: “e” para el sistema dimensional exterior, “i” para el sistema dimensional

interior y “oi” para el sistema dimensional totalmente interior [122]. El valor de $\psi \left(\frac{W}{mK}\right)$ depende de las dimensiones consideradas para el cálculo, y por esa razón se ha indicado el sistema dimensional utilizado ($\psi_e \left(\frac{W}{mK}\right); \psi_{oi} \left(\frac{W}{mK}\right); \psi_i \left(\frac{W}{mK}\right)$). En el caso de los frentes de forjado con fachadas, evaluados en este capítulo, las dimensiones exteriores y las totalmente interiores son equivalentes, y, por esa razón $\psi_e \left(\frac{W}{mK}\right) = \psi_{oi} \left(\frac{W}{mK}\right)$.

Para la definición de los encuentros evaluados con THERM [85], los valores de conductividad térmica $\lambda(W/mK)$ de cada material han sido extraídos de la base de datos de la Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HU) [81]. La composición por capas de los elementos que componen el encuentro se pueden consultar en las Tablas 3.1., 3.6. y en el conjunto de Tablas 3.8.- 3.16. del Capítulo 3. Para las condiciones de contorno, se ha considerado una temperatura interior de 20°C [125] y la temperatura exterior se corresponde con la temperatura media en el mes de enero en Palma de Mallorca (11,6 °C), según dato extraído del Apéndice C del DA DB-HE/2 del CTE [125]. El valor de los coeficientes de película, $h \left(\frac{W}{m^2K}\right)$, se han obtenido como la inversa de las resistencias superficiales especificadas en el DA DB-HE/1 [114], en función de la dirección y sentido del flujo de calor.

Una vez realizada la simulación del encuentro, se ha obtenido el valor del coeficiente de acoplamiento térmico $L^{2D} \left(\frac{W}{mK}\right)$ y el valor de la transmitancia térmica lineal $\psi \left(\frac{W}{mK}\right)$ en los sistemas dimensionales exterior, interior y totalmente interior. Para la obtención del factor de temperatura superficial interior f_{Rsi} , ha sido necesario obtener la temperatura superficial interior mínima θ_{si} , y el valor obtenido de f_{Rsi} para cada uno de los encuentros se ha comparado con el valor de $f_{Rsi, \text{mín}}$ establecido para la zona climática B3 en el CTE [16], para la evaluación del riesgo de formación de condensaciones. A continuación, se ha comparado el valor de la transmitancia térmica lineal $\psi \left(\frac{W}{mK}\right)$ obtenido, con el asignado a partir del catálogo en la HU en el Capítulo 3. Finalmente, se ha obtenido la demanda energética anual de cada uno de los subescenarios, haciendo uso del valor de $\psi \left(\frac{W}{mK}\right)$ calculado. Dichos valores de demanda energética han sido comparados con los que se obtuvieron en el Capítulo 3, con el objetivo de observar el error producido al utilizar valores de catálogo para la transmitancia térmica lineal $\psi \left(\frac{W}{mK}\right)$.

Límites del estudio

Entre los objetivos de este capítulo no se incluye la propuesta de métodos para la rotura del puente térmico lineal de encuentro de frentes de forjado con fachadas. El cálculo llevado a cabo se ha basado en una solución habitual entre los profesionales de la construcción, que ya ha sido considerado previamente en el Capítulo 3 para la estimación de la energía cautiva IEE.

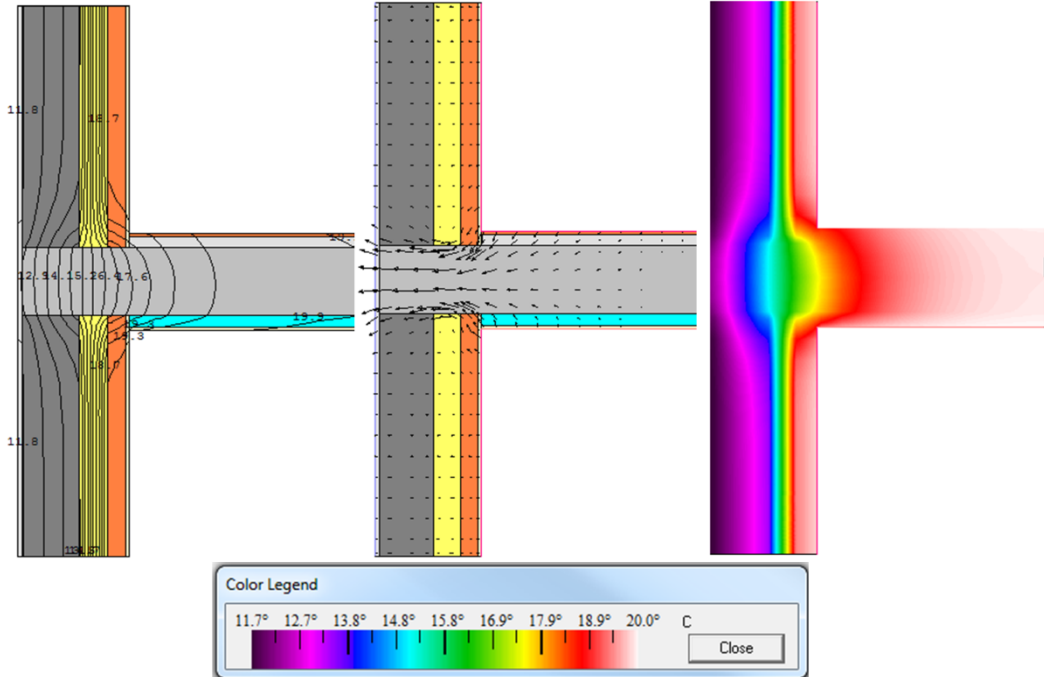
En este capítulo se ha llevado a cabo, además, una comparativa de la demanda energética obtenida en el Capítulo 3 con la obtenida haciendo uso de los valores de $\psi \left(\frac{W}{mK} \right)$, calculados específicamente para los diferentes encuentros de frentes de forjado con fachadas en la vivienda aislada. Hay que recordar que en el anterior capítulo la demanda fue obtenida haciendo uso de los valores de $\psi \left(\frac{W}{mK} \right)$ incluidos en el catálogo de puentes térmicos de la HU. En este caso, se ha decidido realizar la comparativa únicamente para la vivienda aislada, por presentar ésta una mayor longitud de este tipo de encuentros en su envolvente térmica.

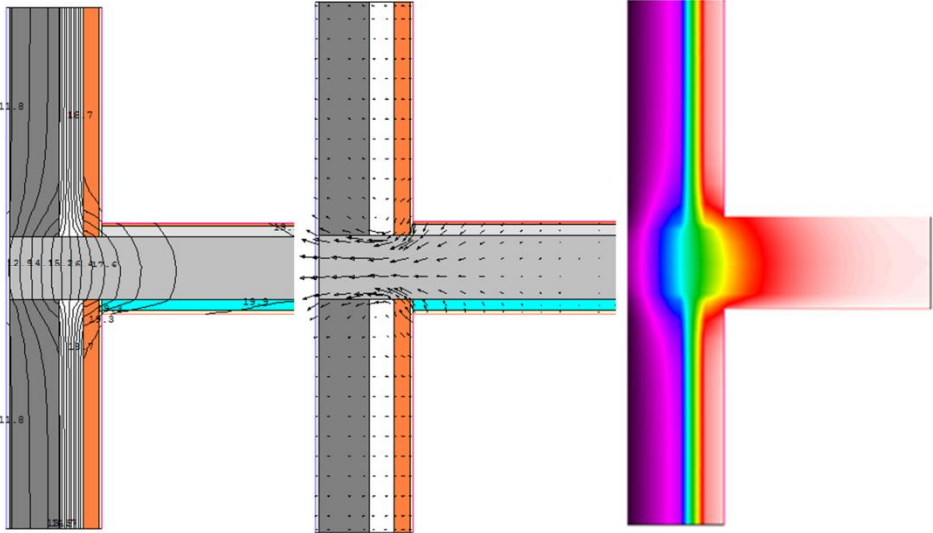
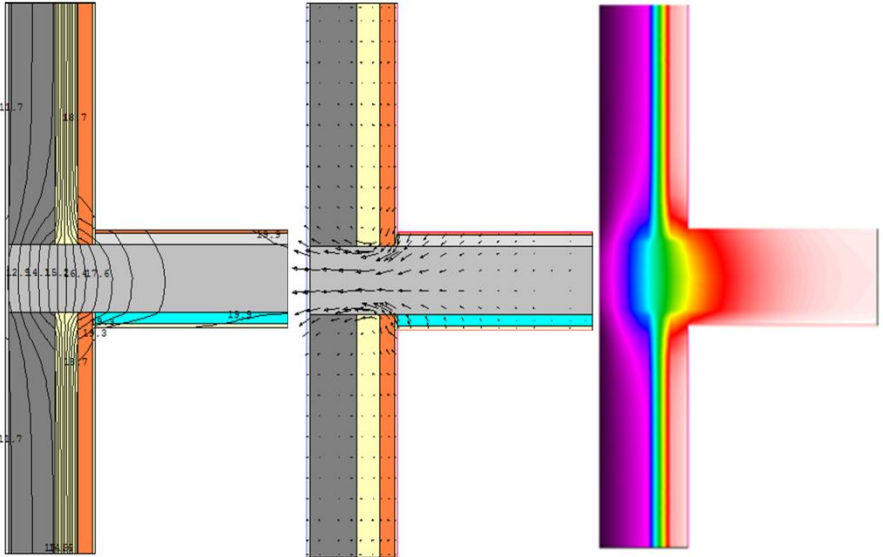
Resultados

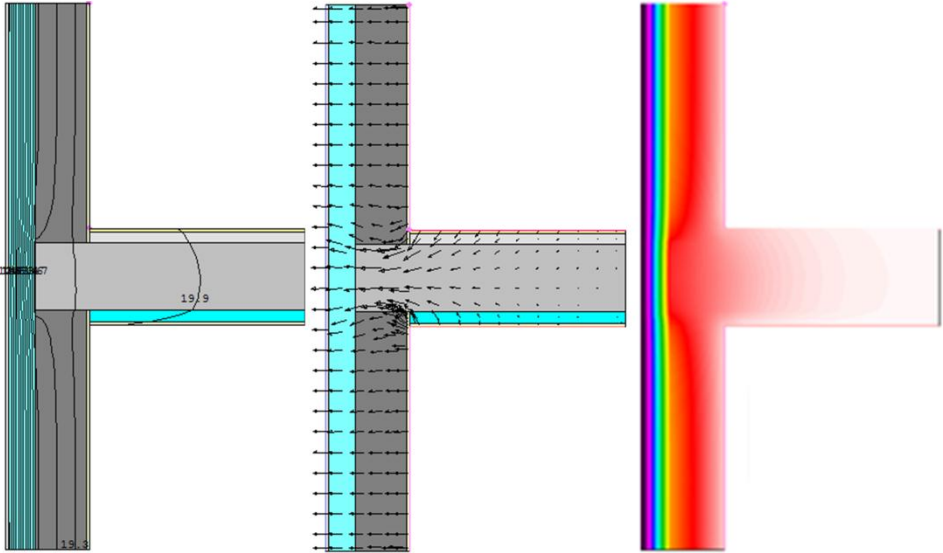
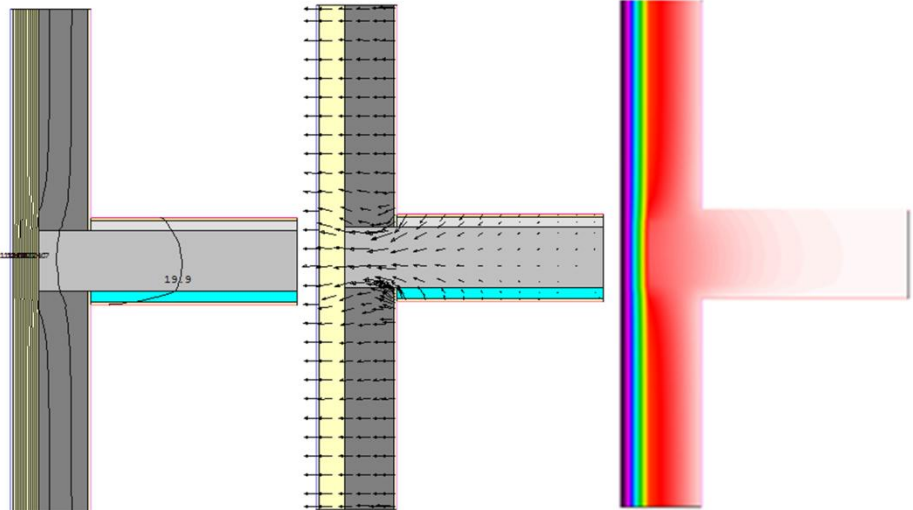
Resultados obtenidos para cada encuentro de frentes de forjado con fachada

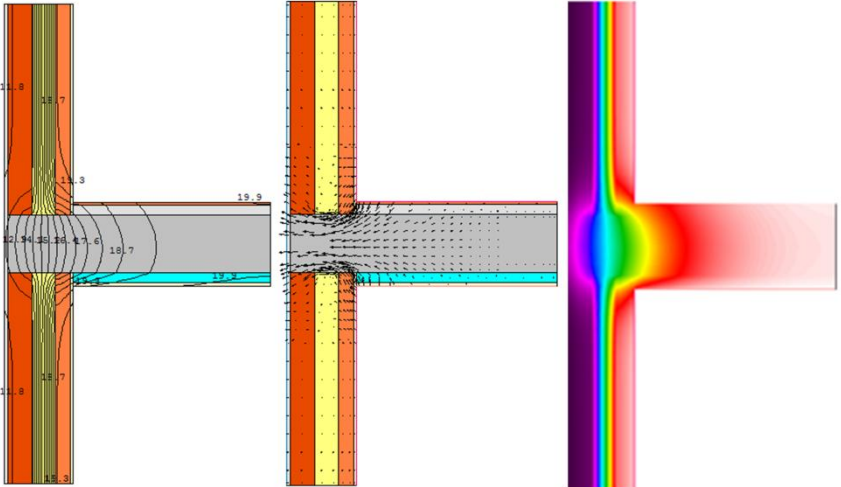
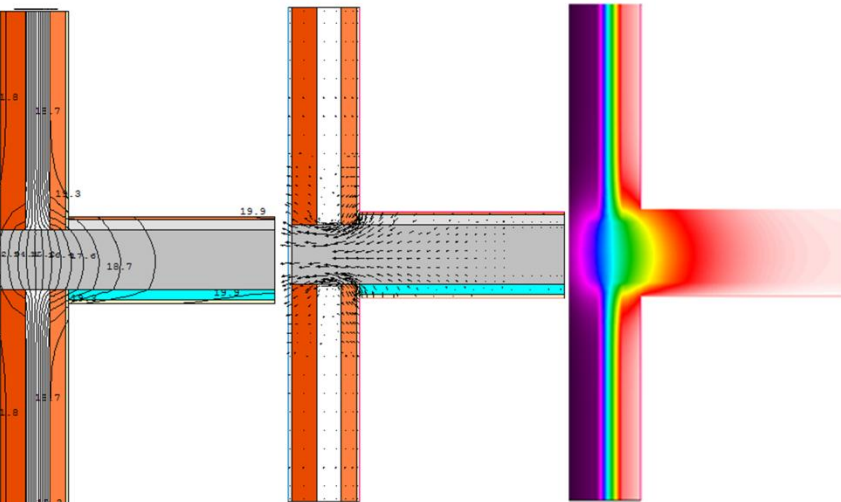
En este apartado se muestran los resultados hallados en cada uno de los encuentros de frente de forjado con fachada evaluados. Los resultados hallados se muestran en la Tabla 4.2. Al realizar el análisis de la demanda energética en el Capítulo 3 se simuló el edificio considerando aislados los encuentros de fachada con forjado. Esta simulación se realizó haciendo uso de los valores de catálogo existentes en la base de datos de la HU utilizada. En este apartado, y con el objetivo de observar el error introducido en los resultados a raíz de estas simulaciones, se han analizado de manera específica aquellos encuentros en los que intervienen fachadas con aislamiento intermedio y en los cuales es necesario llevar a cabo una solución que permita atenuar o romper el puente térmico. La solución considerada consiste en la adición por el exterior de un aislante térmico similar al presente en la fachada en cuestión. En el caso concreto de la lana mineral se ha seleccionado un panel rígido de lana de roca, no hidrófilo, con una conductividad térmica $\lambda = 0,036 \frac{W}{mK}$. En el caso del poliestireno expandido se ha seleccionado un aislante de la misma tipología, no hidrófilo, con una conductividad térmica $\lambda = 0,037 \frac{W}{mK}$. En todos los casos, el espesor considerado para el aislante ha sido de 3 cm y la longitud vertical de 1,2 m. Tal como ya se ha explicado en el apartado de Metodología, ésta es una solución típica aplicada por los profesionales de la construcción para tratar este tipo de encuentros que, como se observará a raíz de los resultados obtenidos, no permite la rotura total del puente térmico. Los resultados hallados se muestran en la Tabla 4.3. En las Tablas 4.4. y 4.5. se muestra un resumen de los resultados obtenidos para la transmitancia térmica lineal de todos los encuentros evaluados juntamente con los valores de catálogo asociados en cada caso por la herramienta HU [81] utilizada para el análisis de la demanda energética.

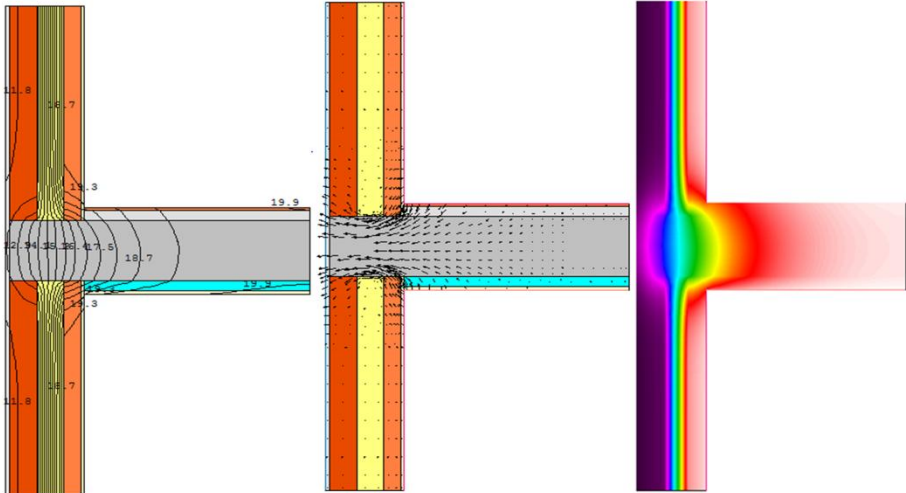
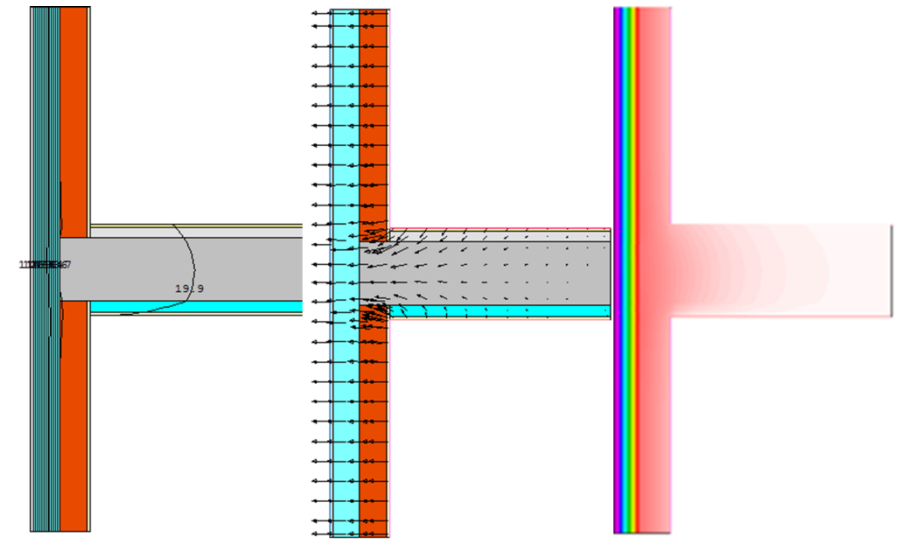
Tabla 4.1. Resultados hallados para cada uno de los encuentros de frente de forjado con fachada evaluados.

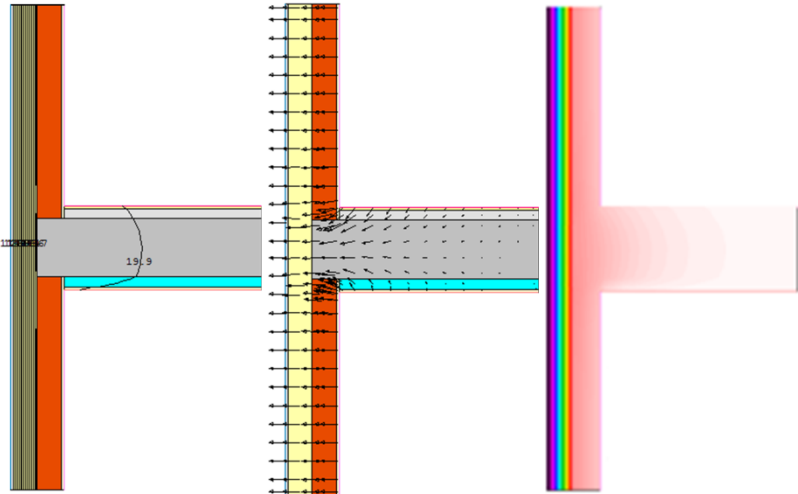
Tipo de puente térmico	Visualización de los resultados (Isotermas, vectores de flujo e infrarrojos)	Resultado de los cálculos
<p>Encuentro de frente de forjado con fachada F_0 (caso base₁)</p>		$L^{2D} = 1,2012 \frac{W}{m K}$ $\psi_e = \psi_{oi} = 0,618 \frac{W}{m K}$ $\psi_i = 0,7212 \frac{W}{m K}$

<p><i>Encuentro de frente de forjado con fachada F₁ (subesc. 1.1.1.)</i></p>		$L^{2D} = 1,1764 \frac{W}{m K}$ $\psi_e = \psi_{oi} = 0,6175 \frac{W}{m K}$ $\psi_i = 0,7164 \frac{W}{m K}$
<p><i>Encuentro de frente de forjado con fachada F₂ (subesc. 1.1.2.)</i></p>		$L^{2D} = 1,0956 \frac{W}{m K}$ $\psi_e = \psi_{oi} = 0,6582 \frac{W}{m K}$ $\psi_i = 0,7356 \frac{W}{m K}$

<p><i>Encuentro de frente de forjado con fachada F₃ (subesc. 1.3.1.)</i></p>		$L^{2D} = 0,5972 \frac{W}{m K}$ $\psi_e = \psi_{oi} = 0,014 \frac{W}{m K}$ $\psi_i = 0,1172 \frac{W}{m K}$
<p><i>Encuentro de frente de forjado con fachada F₄ (subesc. 1.3.2.)</i></p>		$L^{2D} = 0,4676 \frac{W}{m K}$ $\psi_e = \psi_{oi} = 0,0059 \frac{W}{m K}$ $\psi_i = 0,0876 \frac{W}{m K}$

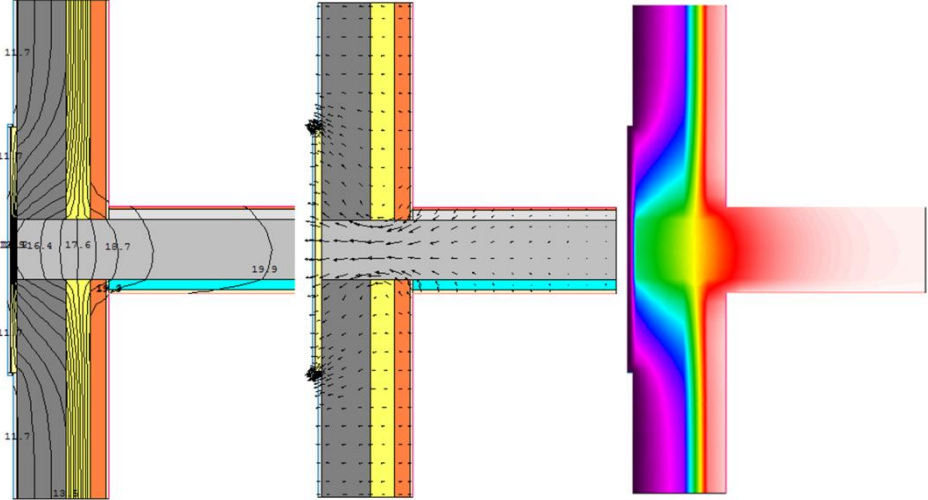
<p><i>Encuentro de frente de forjado con fachada F_{OLC} (subesc. 1.4.1.)</i></p>		$L^{2D} = 1,4696 \frac{W}{m K}$ $\psi_e = \psi_{oi} = 0,7649 \frac{W}{m K}$ $\psi_i = 0,8896 \frac{W}{m K}$
<p><i>Encuentro de frente de forjado con fachada F_{ILC} (subesc. 1.4.2.)</i></p>		$L^{2D} = 1,4332 \frac{W}{m K}$ $\psi_e = \psi_{oi} = 0,7771 \frac{W}{m K}$ $\psi_i = 0,8932 \frac{W}{m K}$

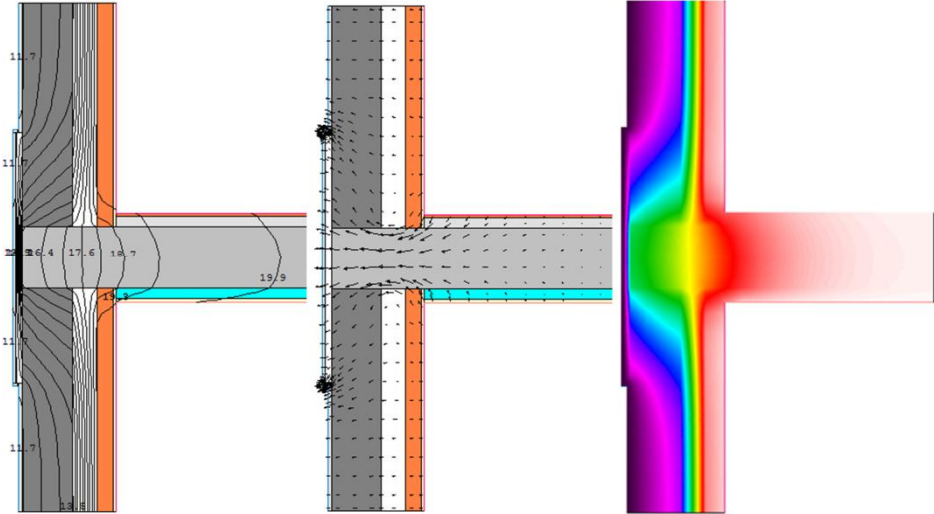
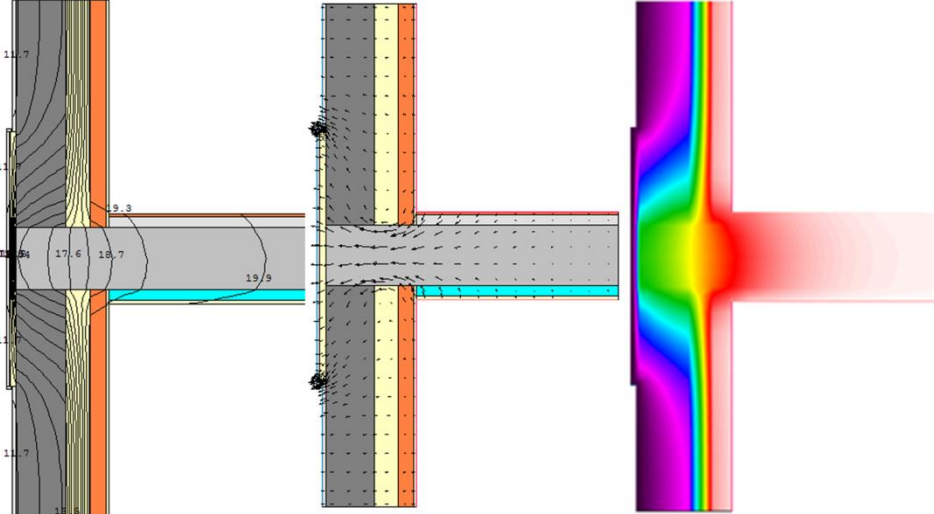
<p>Encuentro de frente de forjado con fachada F_{2LC} (subesc. 1.4.3.)</p>		$L^{2D} = 1,32 \frac{W}{m K}$ $\psi_e = \psi_{oi} = 0,8097 \frac{W}{m K}$ $\psi_i = 0,9 \frac{W}{m K}$
<p>Encuentro de frente de forjado con fachada F_{3LC} (subesc. 1.4.6.)</p>		$L^{2D} = 0,6972 \frac{W}{m K}$ $\psi_e = \psi_{oi} = -0,0075 \frac{W}{m K}$ $\psi_i = 0,1172 \frac{W}{m K}$

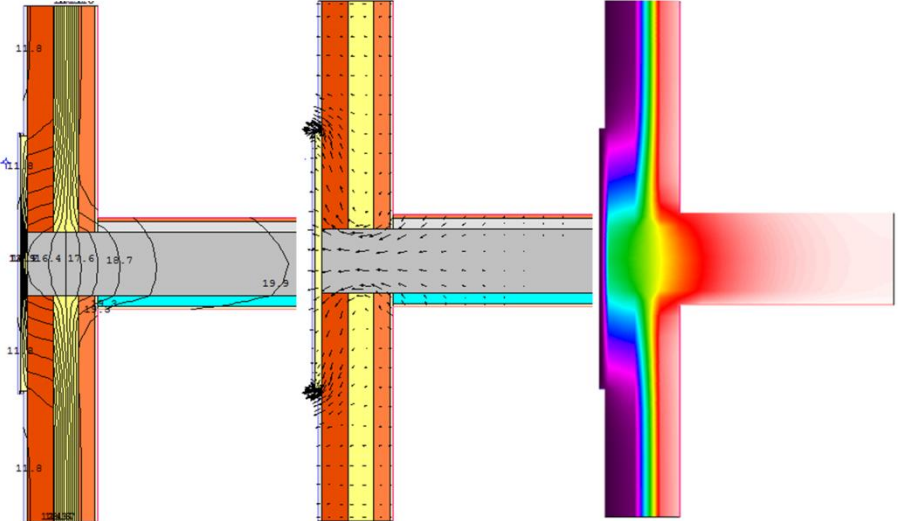
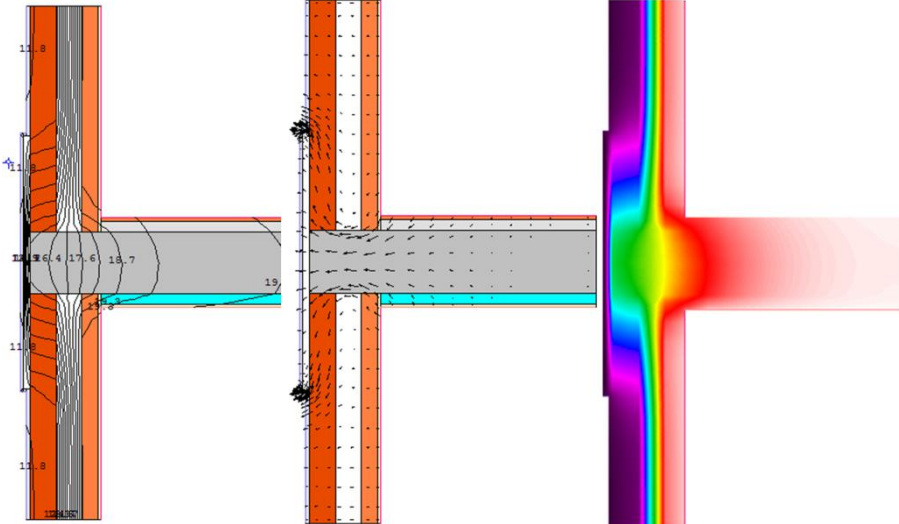
<p>Encuentro de frente de forjado con fachada F_{4LC} (subesc. 1.4.7.)</p>		$L^{2D} = 0,5268 \frac{W}{m K}$ $\psi_e = \psi_{oi} = -0,0078 \frac{W}{m K}$ $\psi_i = 0,0868 \frac{W}{m K}$
--	--	--

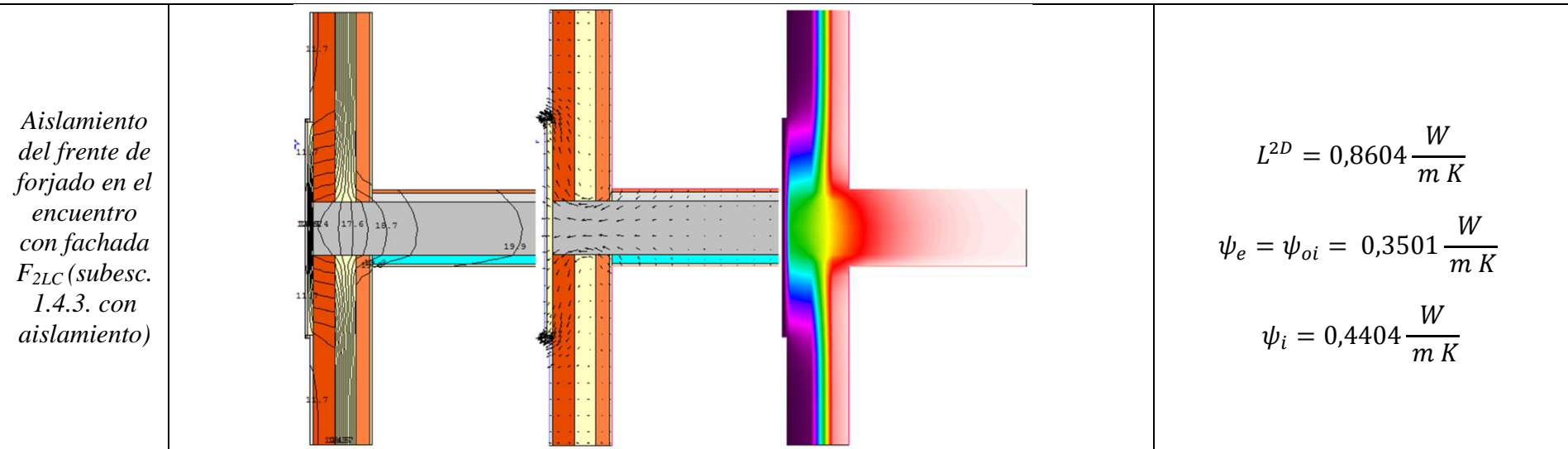
(Fuente: [85]; cálculos propios).

Tabla 4.2. Resultados hallados para cada uno de los encuentros de frente de forjado con fachada evaluados considerando una solución típica de aislamiento del frente de forjado.

Tipo de puente térmico	Visualización de los resultados (Isotermas, vectores de flujo e infrarrojos)	Resultado de los cálculos
<p><i>Aislamiento del frente de forjado en el encuentro con fachada F_0 (caso base₁ con aislamiento)</i></p>		$L^{2D} = 0,8488 \frac{W}{m K}$ $\psi_e = \psi_{oi} = 0,2656 \frac{W}{m K}$ $\psi_i = 0,3688 \frac{W}{m K}$

<p><i>Aislamiento del frente de forjado en el encuentro con fachada F₁ (subesc. 1.1.1. con aislamiento)</i></p>		$L^{2D} = 0,8112 \frac{W}{m K}$ $\psi_e = \psi_{oi} = 0,2523 \frac{W}{m K}$ $\psi_i = 0,3512 \frac{W}{m K}$
<p><i>Aislamiento del frente de forjado en el encuentro con fachada F₂ (subesc. 1.1.2. con aislamiento)</i></p>		$L^{2D} = 0,7012 \frac{W}{m K}$ $\psi_e = \psi_{oi} = 0,2638 \frac{W}{m K}$ $\psi_i = 0,3412 \frac{W}{m K}$

<p><i>Aislamiento del frente de forjado en el encuentro con fachada F_{OLC} (subesc. 1.4.1. con aislamiento)</i></p>		$L^{2D} = 1,0484 \frac{W}{m K}$ $\psi_e = \psi_{oi} = 0,3437 \frac{W}{m K}$ $\psi_i = 0,4684 \frac{W}{m K}$
<p><i>Aislamiento del frente de forjado en el encuentro con fachada F_{ILC} (subesc. 1.4.2. con aislamiento)</i></p>		$L^{2D} = 1 \frac{W}{m K}$ $\psi_e = \psi_{oi} = 0,3439 \frac{W}{m K}$ $\psi_i = 0,46 \frac{W}{m K}$



(Fuente: [85]; cálculos propios).

Tabla 4.3. Resumen de los valores de transmitancia térmica lineal calculados juntamente con los valores de catálogo asociados en la HU para cada caso concreto

Puente térmico de encuentro de frente de forjado con fachada	Transmitancia térmica lineal		
	Valor de catálogo	Valor de usuario	
	$\psi_i \left(\frac{W}{m K} \right)$	$\psi_i \left(\frac{W}{m K} \right)$	$\psi_e \left(\frac{W}{m K} \right); \psi_{oi} \left(\frac{W}{m K} \right)$
Caso base ₁	0,78	0,7212	0,618
Subesc. 1.1.1.	0,77	0,7164	0,6175
Subesc. 1.1.2.	0,72	0,7356	0,6582
Subesc. 1.3.1.	0,09	0,1172	0,014
Subesc. 1.3.2.	0,07	0,0876	0,0059
Subesc. 1.4.1.	0,83	0,8896	0,7649
Subesc. 1.4.2.	0,81	0,8932	0,7771
Subesc. 1.4.3.	0,75	0,9	0,8097
Subesc. 1.4.6.	0,11	0,1172	-0,0075
Subesc. 1.4.7.	0,08	0,0868	-0,0078

(Fuente: [81]; cálculos propios).

Tabla 4.4. Resumen de los valores de transmitancia térmica lineal calculados juntamente con los valores de catálogo asociados en la HU para cada caso concreto.

Puente térmico de encuentro de frente de forjado con fachada con aislamiento de frente de forjado	Transmitancia térmica lineal		
	Valor de catálogo	Valor de usuario	
	$\psi_i \left(\frac{W}{m K} \right)$	$\psi_i \left(\frac{W}{m K} \right)$	$\psi_e \left(\frac{W}{m K} \right); \psi_{oi} \left(\frac{W}{m K} \right)$
Caso base1	0,09	0,3688	0,2656
Subesc. 1.1.1.	0,09	0,3512	0,2523
Subesc. 1.1.2.	0,07	0,3412	0,2638
Subesc. 1.4.1.	0,11	0,4684	0,3437
Subesc. 1.4.2.	0,1	0,46	0,3439
Subesc. 1.4.3.	0,08	0,4404	0,3501

(Fuente: [81]; cálculos propios).

Al comparar la transmitancia térmica lineal calculada en el sistema dimensional interior, se observa que, en general, los valores de catálogo son inferiores a los valores calculados específicamente para cada encuentro. Únicamente se ha observado una

reducción del valor de la transmitancia térmica respecto a los valores de catálogo en los encuentros de frente de forjado con las fachadas F_0 y F_1 (ver Tabla 4.4.). Sin embargo, al considerar el aislamiento de los frentes de forjado las diferencias se hacen mucho mayores. Esto es así, porque los valores de catálogo considerados en la HU [81] únicamente consideran aquellos casos en que el frente de forjado no interrumpe el aislamiento térmico de las fachadas. No contemplándose, por tanto, otras medidas alternativas como la presentada en este estudio.

Finalmente, se ha llevado a cabo en este apartado, una evaluación del riesgo de formación de condensaciones. Tal como se establece en el DA DB-HE/2 [125] la comprobación de la limitación de condensaciones está basada en la comparación de f_{Rsi} con $f_{Rsi, \text{mín}}$, valor tabulado este último en el citado documento. En el caso de la zona climática de invierno B, el valor establecido para $f_{Rsi, \text{mín}}$ es de 0,52 [125]. La obtención de un valor para f_{Rsi} superior a este valor aseguraría la no formación de condensaciones en el encuentro. En las Tablas 4.6. y 4.7. se muestran los resultados hallados tanto para la temperatura superficial interior mínima, como para el factor de temperatura superficial (f_{Rsi}) en todos los casos analizados. A partir de estos resultados se observa que no habría riesgo de formación de condensaciones en ninguno de los encuentros evaluados.

Tabla 4.5. Temperatura superficial interior mínima y factor de temperatura superficial interior para los encuentros de frentes de forjado con fachadas analizados.

Puente térmico de encuentro de frente de forjado con fachada	Descripción breve	$\theta_{si, \text{mín}}$ (°C)	f_{Rsi}
Caso base1	MW	18,6	0,83
Subesc. 1.1.1.	EPS	18,6	0,83
Subesc. 1.1.2.	PUR	18,6	0,83
Subesc. 1.3.1.	AISL. EXT. XPS	19,7	0,96
Subesc. 1.3.2.	AISL. EXT. PUR	19,7	0,96
Subesc. 1.4.1.	MW+LC	18,2	0,79
Subesc. 1.4.2.	EPS+LC	18,2	0,79
Subesc. 1.4.3.	PUR+LC	18,2	0,79
Subesc. 1.4.6.	AISL. EXT. XPS+LC	19,7	0,96
Subesc. 1.4.7.	AISL. EXT. PUR+LC	19,7	0,96

(Fuente: [85]; cálculos propios).

Tabla 4.6. Temperatura superficial interior mínima y factor de temperatura superficial interior para los encuentros de frentes de forjado con fachadas analizados.

Puente térmico de encuentro de frente de forjado con fachada con aislamiento de frente de forjado	Descripción breve	$\theta_{si, \text{mín}}$ (°C)	f_{Rsi}
Caso base1	MW	19,2	0,90
Subesc. 1.1.1.	EPS	19,2	0,90
Subesc. 1.1.2.	PUR	19,3	0,92

Subesc. 1.4.1.	MW+LC	19	0,88
Subesc. 1.4.2.	EPS+LC	19	0,88
Subesc. 1.4.3.	PUR+LC	19,1	0,89

(Fuente: [85]; cálculos propios).

Comparación de los resultados obtenidos para la demanda energética

En este apartado, se ha llevado a cabo una comparativa de los valores de demanda energética anual que se obtuvieron en el Capítulo 3, con los obtenidos haciendo uso en la herramienta HU, de los valores calculados para $\psi \left(\frac{W}{mK} \right)$ en los encuentros de frentes de forjado con fachadas. Como ya se ha observado en las Tablas 4.4. y 4.5. del apartado anterior, los valores de catálogo de la HU [81] se corresponden con el sistema dimensional interior. Sin embargo, el sistema dimensional requerido por la herramienta para los valores calculados por el usuario para este tipo de encuentros, es el exterior. En las Figuras 4.5., 4.6., 4.7. y 4.8. se han representado los valores de demanda energética de calefacción y refrigeración obtenidos, juntamente con los que se obtuvieron en el Capítulo 3.

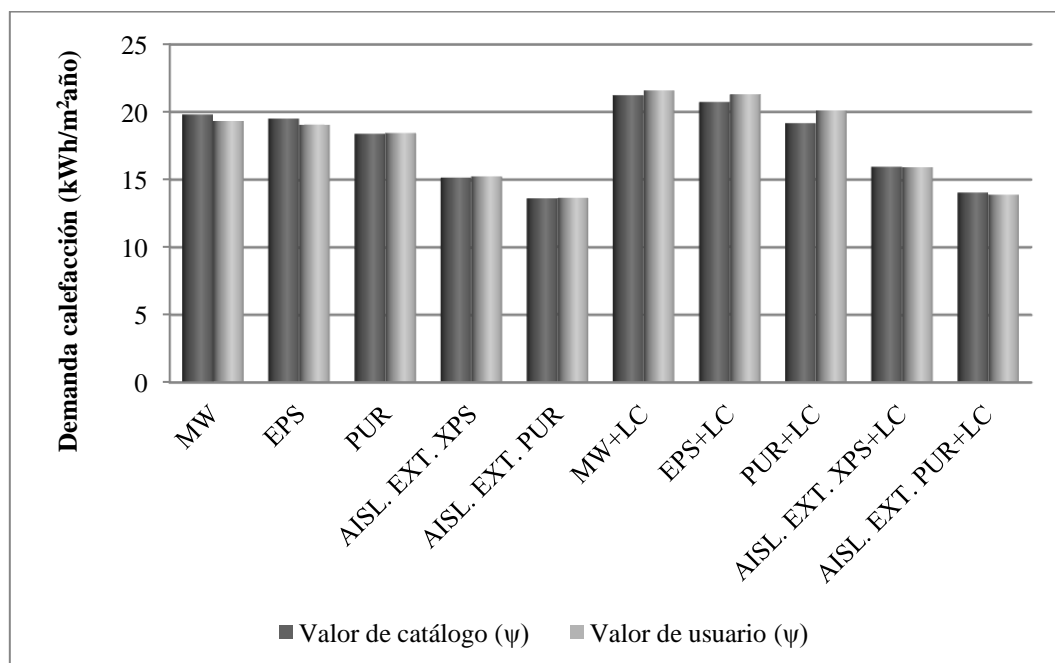


Figura 4.1. Demanda de calefacción anual obtenida con la HU haciendo uso del valor de catálogo o del valor calculado para la transmitancia térmica lineal $\psi(W/mK)$.

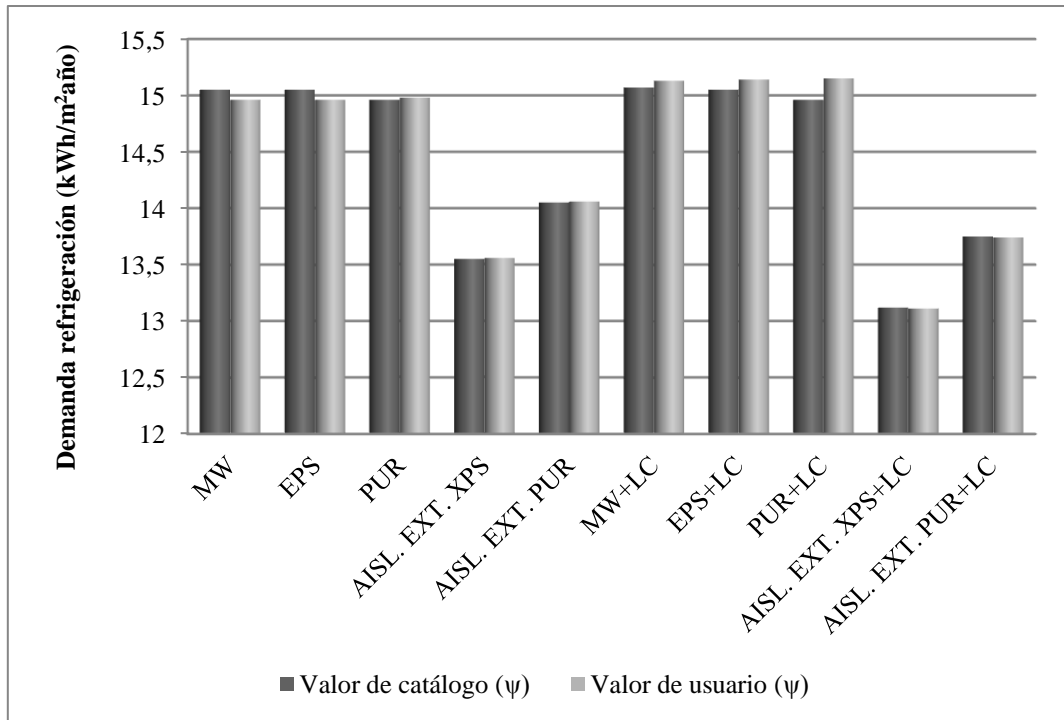


Figura 4.2. Demanda de refrigeración anual obtenida con la HU haciendo uso del valor de catálogo o del valor calculado para la transmitancia térmica lineal ψ (W/mK).

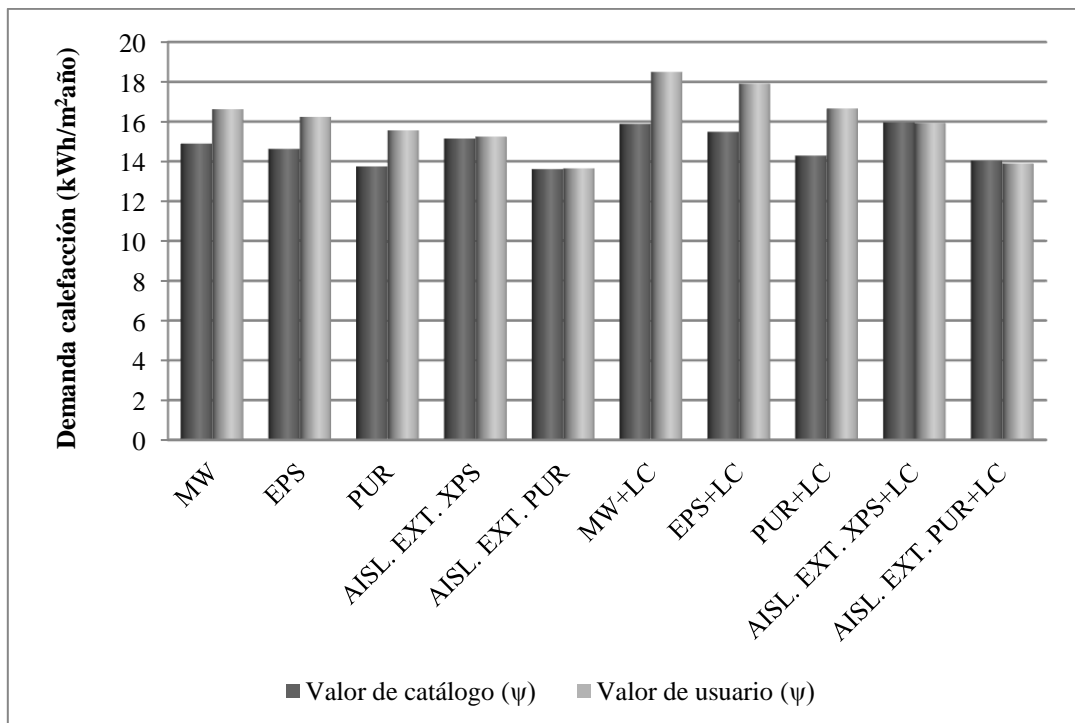


Figura 4.3. Demanda de calefacción anual obtenida con la HU haciendo uso del valor de catálogo o del valor calculado para la transmitancia térmica lineal ψ (W/mK) , en el caso de considerar el aislamiento de los frentes de forjado.

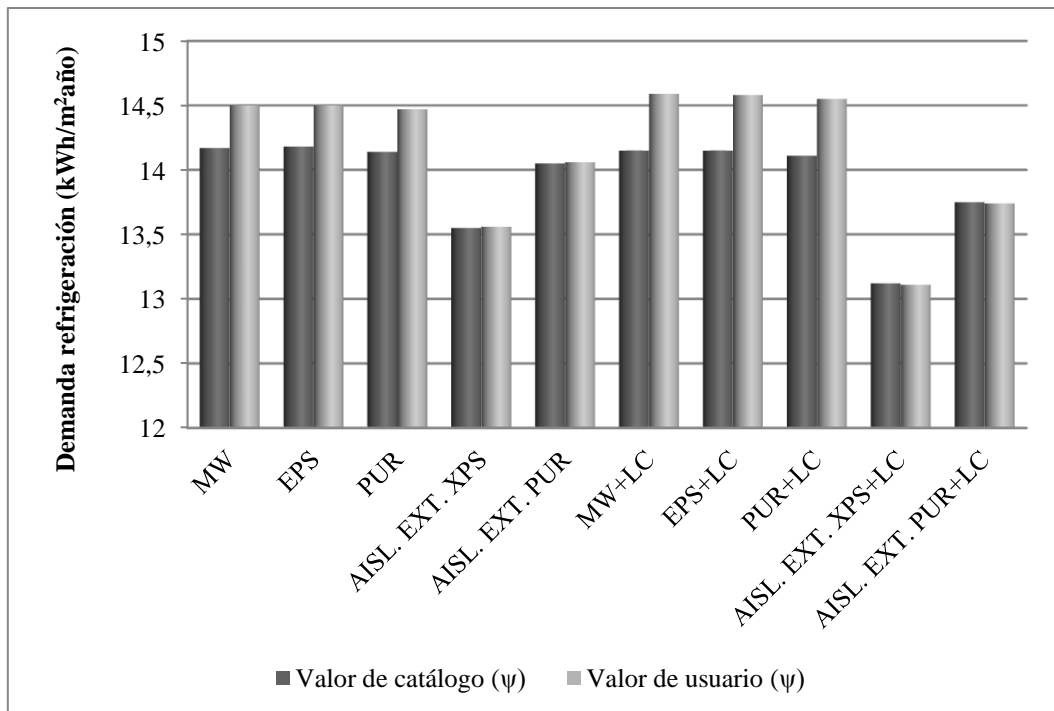


Figura 4.4. Demanda de refrigeración anual obtenida con la HU haciendo uso del valor de catálogo o del valor calculado para la transmitancia térmica lineal ψ (W/mK), en el caso de considerar el aislamiento de los frentes de forjado.

A partir de los resultados obtenidos, se observa que las diferencias obtenidas en la demanda de calefacción van desde reducciones del 2,5% hasta incrementos próximos al 5%. En cuanto a la demanda de refrigeración las diferencias no superan el 1,3% en ningún caso. Al considerar aislados los frentes de forjado, las diferencias obtenidas para la demanda de calefacción presentan variaciones situadas entre el 10% y el 17%, mientras que las diferencias observadas en la demanda de refrigeración se mantienen por debajo del 3,2% en todos los casos.

Discusión

El sector de la edificación es responsable del 40% del consumo energético en la Unión Europea (UE) [15]. Actualmente, la reducción de los consumos energéticos y las emisiones de CO₂ se ha convertido en una necesidad y se ha establecido como un factor clave en la mitigación del cambio climático. La necesidad de cumplir los objetivos de reducción de las emisiones de CO₂ en el marco del Protocolo de Kioto, ha impulsado la aprobación de estrategias y planes nacionales, entre ellos la certificación de eficiencia energética de los edificios. Sin embargo, son muchos los autores que destacan el hecho de que en las normativas no se establezcan limitaciones con respecto a la energía cautiva y las emisiones asociadas a los materiales utilizados en la construcción.

En este estudio, se ha llevado a cabo la cuantificación de la energía consumida y las emisiones de CO₂ en diferentes fases de edificios del sector terciario y residencial de las Islas Baleares. Se ha observado que en este campo de investigación son muchas las metodologías y las bases de datos utilizadas. Son muchos los autores que han investigado y analizado los impactos medioambientales asociados a los materiales y su efecto sobre el ciclo de vida de los edificios. Sin embargo, los límites establecidos al sistema evaluado, la presentación de los resultados y la diferente localización de los edificios, en ocasiones dificultan las comparaciones. Los estudios se centran fundamentalmente en la evaluación de viviendas y son pocos los análisis llevados a cabo en edificios del sector terciario. El análisis de edificios de grandes dimensiones es prácticamente inexistente en la bibliografía. La gran cantidad de materiales asociados a estos últimos, hacen de ellos un objetivo interesante en el marco de reducción de los impactos medioambientales asociados a la edificación. La propuesta de medidas de mejora para reducir los impactos medioambientales de los edificios es a día de hoy más que necesario. En este estudio se han propuesto medidas de reducción de la energía cautiva, las emisiones de CO₂ y las necesidades energéticas para diferentes tipologías de edificios. En este análisis se han evaluado un gran número de escenarios, con el objetivo de proporcionar una herramienta útil para la comparación de diferentes diseños. El aislamiento de los puentes térmicos es un aspecto importante a tener en cuenta a la hora de reducir las necesidades energéticas de un edificio. Su análisis desde el punto de vista de la energía cautiva ha sido incluido, por ser éste un aspecto no contemplado en los estudios.

Una de las mayores conclusiones obtenidas en este trabajo es el beneficio medioambiental de reemplazar los forjados estructurales de hormigón armado por forjados de madera. Este no es un resultado nuevo. De hecho, varios autores han analizado esta sustitución en diferentes edificios y en localizaciones diversas. Sin embargo, es una realidad que la tendencia del sector de la construcción muestra un incremento en el uso de estructuras de hormigón armado o acero, así como en el uso de materiales como el aluminio para las ventanas. Aspectos como el tipo de aislamiento o los marcos utilizados en las ventanas deberían ser seleccionados después de haber llevado a cabo un análisis completo de los mismos en la etapa de diseño. El aislamiento seleccionado para un proyecto puede modificar sustancialmente el impacto sobre el medio ambiente de un edificio. Generalmente, esta elección está basada en la energía operacional y, por tanto, aspectos como la energía cautiva, son ignorados. En este

estudio, se ha observado que la utilización de PUR inyectado o XPS en las fachadas provoca incrementos de la energía cautiva equivalente a la demanda de calefacción de una vivienda aislada para un periodo de más de 5 años. El análisis de la fase de construcción y la fase operacional en viviendas ha mostrado que la sustitución de los marcos de madera por marcos de aluminio lacado provoca incrementos en el consumo de calefacción para un tiempo de vida de 50 años y un incremento de la energía cautiva hasta 4 veces mayor. El estudio del aislamiento de los puentes térmicos ha mostrado incrementos pequeños del valor de la energía cautiva y reducciones importantes de la energía operacional de los edificios. La complejidad de los edificios como sistema y el gran número de elementos incluidos en ellos, han hecho necesario establecer límites en el análisis que deberán ser tenidos en cuenta a la hora de observar los resultados.

La intención de este estudio es proporcionar un trabajo práctico que pueda ser de utilidad a otros investigadores y a los profesionales del sector de la construcción, especialmente para edificios en clima Mediterráneo. Se espera que la metodología y la información proporcionada contribuyan a la investigación de la relación de los edificios con el medioambiente.

Conclusiones

En este estudio se ha llevado a cabo el análisis de la energía consumida y las emisiones de CO₂ en diferentes fases del ciclo de vida de una serie de edificios del sector terciario y residencial situados en las Islas Baleares. Las conclusiones más relevantes se presentan a continuación para cada de las evaluaciones realizadas:

- En el análisis del ciclo de vida de las emisiones de CO₂ en edificios hoteleros:

-Respecto a la composición de los edificios y la masa analizados en la fase de construcción, se ha observado que los materiales que componen la estructura suponen entre el 45% y el 50% de la masa total. Una de las menores participaciones ha venido dada por los materiales que componen las instalaciones, con una participación próxima al 1,5% de la masa total.

-Respecto a las emisiones de CO₂ a lo largo del ciclo de vida de los edificios, se ha observado que en la fase de construcción entre el 87% y el 98% corresponde a las emisiones procedentes de los procesos de extracción, transporte y fabricación de los materiales. Los procesos de construcción han supuesto el tanto por ciento restante. La fase operacional ha presentado una participación a las emisiones de CO₂ totales a lo largo del ciclo de vida entre el 80% y el 90% en los hoteles analizados. Las emisiones de CO₂ de la fase de reformas han mostrado valores que son una cuarta parte de las emisiones asociadas a la fase de construcción. La fase de demolición ha mostrado un valor de emisiones de CO₂ entre 8 y 9 veces inferior a las asociadas a la fase de construcción de los edificios. El análisis del factor de emisión de CO₂ asociado a la generación eléctrica en Baleares ha mostrado un valor muy superior al del sistema eléctrico peninsular y una escasa variación para un periodo de tiempo de 15 años.

- En el análisis de la energía cautiva y las emisiones de CO₂, y sus medidas de reducción en un edificio educativo de grandes dimensiones:

-Respecto al análisis de la fase de construcción del edificio original, los valores obtenidos para la IEE y para las IECO₂ han sido de 1775,75 kWh/m² y 695,3 kgCO₂/m², respectivamente. Se ha observado que 13 de las 87 unidades de obra del estado de mediciones han presentado una contribución conjunta del 75% y del 77% a la IEE y a las IECO₂ del edificio. De las 13 unidades de obra con una mayor participación a la IEE, se ha observado que sólo dos de ellas (los forjados estructurales de hormigón armado y los marcos de aluminio anodizado de las ventanas) han mostrado tener una participación conjunta próxima al 34% a la IEE total del edificio.

-Respecto al análisis de alternativas para el edificio, se ha observado que la IEE y las IECO₂ de los forjados estructurales de hormigón armado han presentado valores 2,7 y 3,3 veces superiores a los correspondientes a forjados de madera con las mismas características estructurales. Los valores de IEE y de IECO₂ de los marcos de aluminio anodizado del edificio original han mostrado ser superiores a los correspondientes a los marcos de aluminio lacado, de PVC y de madera de pino y de roble en 3,5%, 49,1%, 98,3% and 98,7%, respectivamente. El pavimento de terrazo

ha mostrado tener un valor de IEE superior a los valores asociados a pavimentos de granito y linóleo en un 79% y un 92%, respectivamente. Mientras que al compararlo con pavimentos de gres o gres porcelánico, su valor es inferior en torno al 64%. Las fachadas con aplacado de losas de hormigón prefabricado han mostrado valores de IEE y de IE_{CO₂} superiores en un 51% y un 70%, respectivamente, a los asociados a una fachada ventilada con paneles de chapa de madera natural.

-En la aplicación en el edificio de las medidas propuestas, se ha observado que la sustitución de los forjados estructurales de hormigón armado por forjados de madera ha provocado una reducción del 14% en la IEE y una reducción de las emisiones de 1700 tCO₂. La reducción obtenida en la IEE del edificio al sustituir los marcos de aluminio anodizado de las ventanas por marcos de madera de pino ha sido de cerca del 12%, con una reducción de las emisiones superiores a 2000 tCO₂ y una reducción del presupuesto del 4,5%. La sustitución del pavimento de terrazo del edificio original por un pavimento de granito ha mostrado una reducción en los valores de IEE y de IE_{CO₂} (del 3% y 327 tCO₂, respectivamente) con un incremento del 30% en el presupuesto. Su sustitución por pavimentos de gres ha mostrado incrementos en ambos valores, mientras que la utilización de un pavimento de linóleo ha provocado una reducción del 3% en la IEE y de más de 400 tCO₂ en el valor de las IE_{CO₂}.

-Respecto a la propuesta de escenarios de mejora, se ha observado que el escenario en el que se han sustituido los forjados de hormigón por forjados estructurales de madera, junto con la sustitución del pavimento de terrazo por un pavimento de linóleo y la sustitución de los marcos de aluminio anodizado por marcos de madera de pino, ha mostrado las mayores reducciones en los valores de IEE y de IE_{CO₂} del edificio, superiores al 26% y a 4100 tCO₂, respectivamente, y un incremento del presupuesto del 2%. El escenario en el que se han sustituido los forjados de hormigón armado por forjados de madera y los marcos de las ventanas por marcos de aluminio lacado ha mostrado las reducciones más pequeñas de todos los escenarios evaluados. Las reducciones obtenidas en este caso han sido del 14% en el valor de la IEE y de más de 1770 tCO₂ en el valor de las IE_{CO₂}, con un incremento del 5,4% en el presupuesto.

- En el análisis de la relación entre la demanda energética y la energía cautiva en edificios residenciales:

- Respecto a la demanda energética final y los valores de la energía cautiva (IEE), se ha observado que la conversión de una vivienda aislada a una vivienda entre medianeras ha reducido la demanda energética en 8,2 kWh/m²año para calefacción y en cerca de 7 kWh/m²año para refrigeración, mientras que la reducción obtenida en el valor de IEE ha sido de casi 31 kWh/m². La conversión de una vivienda aislada a un dúplex situado en un bloque de viviendas, se han obtenido reducciones próximas a 15 kWh/m²año para calefacción y de 8 kWh/m²año para refrigeración, con una reducción en el valor de IEE de 75,3 kWh/m². La utilización de aislamiento XPS en las fachadas ha provocado reducciones próximas a 5 kWh/m²año y 3 kWh/m²año para la demanda de calefacción y refrigeración, respectivamente, en el caso de la vivienda aislada y la vivienda entre medianeras, con un incremento de IEE de 88 kWh/m² y 43 kWh/m², respectivamente. La sustitución de la cubierta ligeramente ventilada por una cubierta plana ha mostrado reducciones para la demanda final de

calefacción de 4 kWh/m²año con una reducción de la IEE de 44 kWh/m² y 55 kWh/m² para la vivienda aislada y la vivienda entre medianeras, respectivamente. La sustitución de los marcos de madera de las ventanas por PVC ha provocado variaciones despreciables, por debajo de 0,25 kWh/m²año, para la demanda energética en las tres tipologías de vivienda, con un incremento de IEE situado entre 70 kWh/m² y 103 kWh/m². Su sustitución por marcos de aluminio lacado ha mostrado también variaciones pequeñas, por debajo de 1,1 kWh/m²año en las tres tipologías, con un incremento de IEE entre 130 kWh/m² y 200 kWh/m².

-Respecto a los puentes térmicos, se ha observado que el aislamiento de los encuentros de frentes de forjado con fachadas ha provocado reducciones en la demanda energética próximas a 5 kWh/m²año para la vivienda aislada y por debajo de 3 kWh/m²año para la vivienda entre medianeras y el dúplex, con variaciones despreciables en refrigeración. Las variaciones de IEE han mostrado valores por debajo de 13,5 kWh/m², en todos los casos. De manera general, el aislamiento de los encuentros de forjado con fachada ha provocado incrementos del valor de IEE 1,17 y 12 veces inferiores a la demanda anual de calefacción obtenida al no considerar su aislamiento. El aislamiento de pilares ha provocado reducciones de la demanda anual de calefacción de 4 kWh/m²año e incrementos de IEE por debajo de 4,5 kWh/m².

-Con respecto a la comparación llevada entre las variaciones de IEE y el consumo de energía primaria para un tiempo de vida de 50 años, se ha observado que la utilización de aislamiento de PUR inyectado en fachadas ha provocado reducciones del consumo de energía primaria para calefacción entre 64,4 kWh/m² y 99,4 kWh/m², mientras que el incremento de IEE ha sido de 100,4 kWh/m² para la vivienda aislada con frentes de forjado no aislados. La sustitución de los marcos de madera por marcos de aluminio lacados ha provocado un incremento del consumo de energía primaria para calefacción situado entre 49,5 kWh/m² y 76,8 kWh/m² con reducciones para refrigeración por debajo de 5 kWh/m². El incremento obtenido para IEE en este último caso, ha sido de cerca de 200 kWh/m².

- En el análisis de los puentes térmicos lineales de encuentro de frentes de forjado con fachadas:

-La comparación de los valores de transmitancia térmica lineal de la Herramienta Unificada LIDER-CALENER de los encuentros, con los valores calculados con la herramienta THERM, han mostrado diferencias máximas de 0,15 W/mK. Al considerar el aislamiento de los frentes de forjado, se ha observado que la utilización de los valores de catálogo en el caso de fachadas de doble hoja con aislamiento térmico intermedio, los incrementos en el valor de ψ ($\frac{W}{mK}$), pueden llegar hasta 0,36 W/mK.

-Respecto a la modificación de la demanda de refrigeración haciendo uso de los valores calculados para la transmitancia térmica lineal, se ha observado que no superan el 3,2% en ningún caso. En el caso de la demanda de calefacción, se ha observado que las variaciones se mantienen por debajo del 5%, y por debajo del 17% en el caso de considerar el aislamiento de los frentes de forjado.

La preocupación por el medio ambiente y el cambio climático han llevado a un gran número de países a la instauración de medidas de mitigación de los impactos provocados por las acciones humanas. Los estudios que analizan la relación entre los edificios y el medio ambiente son a día de hoy más que necesarios. El análisis mostrado en este estudio, muestra cómo cambios pequeños y una selección adecuada de los materiales de construcción en la etapa de diseño pueden reducir los impactos provocados por la edificación sobre el medio.

Referencias

- [1] N. Stern, “Stern Review on the Economics of Climate Change,” 2006. [Online]. Available: http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/+http://www.hm-treasury.gov.uk/sternreview_index.htm.
- [2] Observatorio de Mauna Loa, Earth System Research Laboratory, and Administración Oceánica y Atmosférica Nacional (NOAA Research) Departamento de Comercio (USA), “Trends in Atmospheric Carbon Dioxide,” 2015. [Online]. Available: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>.
- [3] A. G. Gaglia, C. a. Balaras, S. Mirasgedis, E. Georgopoulou, Y. Sarafidis, and D. P. Lalas, “Empirical assessment of the Hellenic non-residential building stock, energy consumption, emissions and potential energy savings,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 48, no. 4, pp. 1160–1175, 2007.
- [4] Sociedad Pública de Gestión Ambiental (Ihobe), “Edificación y Rehabilitación Ambientalmente Sostenible en Euskadi 13 casos prácticos de excelencia ambiental,” 2014. [Online]. Available: <http://www.upv.es/contenidos/CAMUNISO/info/U0660239.pdf>.
- [5] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) y Ministerio de Industria Turismo y Comercio (MINETUR), “Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012. Plan de Acción 2008-2012.” [Online]. Available: http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/legislacion/documentacion/plan_accion_2008_2012_tcm7-12597.pdf.
- [6] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), “Plan de Ahorro y Eficiencia energética 2011-2020. 2º Plan de Acción Nacional de Eficiencia Energética en España.” 2011. [Online]. Available: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11905_PAEE_2011_2020_A2011_A_a1e6383b.pdf.
- [7] Instituto Nacional de Estadística (INE), “Censos de Población y Viviendas,” *Demografía y población (INEbase)*, 2011. [Online]. Available: Elaboración propia a partir de datos de www.ine.es.
- [8] A. Cuchí and A. Pagès, “Sobre una estrategia para dirigir al sector de la edificación hacia la eficiencia en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI),” *Ministerio de la Vivienda. Gobierno de España.*, 2007. .
- [9] A. Cuchí and P. Sweatman, “Una Visión-País para el Sector de la Edificación en España. Hoja de Ruta para un Nuevo Sector de la Vivienda.” *Grupo de Trabajo sobre Rehabilitación “GTR” GBCE Fundación CONAMA*, 2011. [Online]. Available: http://www.gbce.es/archivos/ckfinderfiles/Investigacion/libro_GTR_cast_postimprenta.pdf.

- [10] United Nations Environment Programme, “Report of the United Nations Conference on the Human Environment (Stockholm),” 1972. [Online]. Available: <http://www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.asp?DocumentID=97>.
- [11] Brundtland et al., “Report of the World Commission on Environment and Development: Our common future,” 1987. [Online]. Available: <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>.
- [12] United Nations Framework Convention on Climate Change, “Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change,” 1997. [Online]. Available: http://unfccc.int/essential_background/kyoto_protocol/background/items/1351.php.
- [13] European Commission, “Europe 2020,” 2010. [Online]. Available: http://ec.europa.eu/archives/commission_2010-2014/president/news/documents/pdf/20100303_1_en.pdf.
- [14] European Commission, “Hoja de ruta hacia una economía hipocarbónica competitiva en 2050,” 2011. [Online]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0112:FIN:ES:PDF>.
- [15] Parlamento Europeo y Consejo, “Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2002 relativa a la Eficiencia Energética de los Edificios,” 2002. [Online]. Available: <https://scholar.google.es/scholar?hl=es&q=Directiva+2002%2F91%2FCE+&btnG=&lr=#0>. [Accessed: 15-Apr-2015].
- [16] Ministerio de Fomento and Gobierno de España, “Ministerio de Fomento. Código Técnico de la Edificación. Real Decreto 314/2006. Texto refundido con modificaciones del RD 1371/2007, de 19 de octubre y corrección de errores del BOE de 25 de enero de 2008,” *Documento Básico HE Ahorro de Energía*, 2008. [Online]. Available: http://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/ARQ_VIVIENDA/_INFORMACION/NORMATIVA/CodigoEdificacion.htm.
- [17] Ministerio de la Presidencia, “REAL DECRETO 47/2007, de 19 de enero, por el que se aprueba el Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción.,” *BOE núm. 27*, 2007. [Online]. Available: <https://www.boe.es/boe/dias/2007/01/31/pdfs/A04499-04507.pdf>.
- [18] Parlamento Europeo y Consejo, “Directiva 2010/31/UE, de 19 de mayo relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición),” *Diario Oficial de la Unión Europea*, 2010. [Online]. Available: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Directiva_2010-31_UE_EE_en_edificios_Refundicion_d3ee0458.pdf.
- [19] European Commission, “Informe de la Comisión al Parlamento Europeo y al Consejo. Avances efectuados por los Estados miembros en la implantación de

- edificios de consumo de energía casi nulo,” *COM/2013/0483 final, Bruselas*, 2013. [Online]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2013:0483:FIN:ES:HTML>.
- [20] R. Nuij, “Intelligent Energy Europe.,” *Intelligent Energy Europe Info Day, Session: Energy efficiency & renewable energy use in buildings, BUILD UP Skills, Key Policy Developments, Directorate-General for Energy*, 2013. [Online]. Available: <http://ec.europa.eu/energy/intelligent/files/events/doc/infoday13/parallel/buildings/1-nuij-energy-in-buildings-policy-overview.pdf>.
- [21] “Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE.” *Diario Oficial de la Unión Europea*.
- [22] Ministerio de la Presidencia, “Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios,” *BOE núm. 89*, 2013. [Online]. Available: <https://www.boe.es/boe/dias/2013/04/13/pdfs/BOE-A-2013-3904.pdf>.
- [23] X. G. Casals, “Analysis of building energy regulation and certification in Europe: Their role, limitations and differences,” *Energy Build.*, vol. 38, no. 5, pp. 381–392, 2006.
- [24] I. Zabalza Bribián, A. Aranda Usón, and S. Scarpellini, “Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification,” *Build. Environ.*, vol. 44, no. 12, pp. 2510–2520, 2009.
- [25] S. Kotaji, A. Schuurmans, and S. Edwards, “Life Cycle Assessment in Building and Construction: a state of the art report.” *Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC)*, 2003.
- [26] L. Gustavsson and A. Joelsson, “Life cycle primary energy analysis of residential buildings,” *Energy Build.*, vol. 42, no. 2, pp. 210–220, Feb. 2010.
- [27] G. A. Blengini and T. Di Carlo, “The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings,” *Energy Build.*, vol. 42, no. 6, pp. 869–880, Jun. 2010.
- [28] C. K. Chau, T. M. Leung, and W. Y. Ng, “A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings,” *Appl. Energy*, vol. 143, pp. 395–413, Apr. 2015.
- [29] A. Stephan, R. H. Crawford, and K. de Myttenaere, “A comprehensive assessment of the life cycle energy demand of passive houses,” *Appl. Energy*, vol. 112, pp. 23–34, 2013.

- [30] D. ürge-Vorsatz, L. D. Danny Harvey, S. Mirasgedis, and M. D. Levine, "Mitigating CO₂ emissions from energy use in the world's buildings," *Build. Res. Inf.*, vol. 35, no. 4, pp. 379–398, Aug. 2007.
- [31] J. Kneifel, "Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings," *Energy Build.*, vol. 42, no. 3, pp. 333–340, Mar. 2010.
- [32] R. Cole and P. Kernan, "Life-cycle energy use in office buildings," *Build. Environ.*, 1996.
- [33] T. Ramesh, R. Prakash, and K. K. Shukla, "Life cycle energy analysis of buildings: An overview," *Energy Build.*, vol. 42, no. 10, pp. 1592–1600, Oct. 2010.
- [34] I. Sartori and A. G. Hestnes, "Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article," *Energy Build.*, vol. 39, no. 3, pp. 249–257, Mar. 2007.
- [35] C. Scheuer, G. A. Keoleian, and P. Reppe, "Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications," *Energy Build.*, vol. 35, no. 10, pp. 1049–1064, Nov. 2003.
- [36] G. . Florides, S. . Tassou, S. . Kalogirou, and L. . Wrobel, "Measures used to lower building energy consumption and their cost effectiveness," *Appl. Energy*, vol. 73, no. 3–4, pp. 299–328, Nov. 2002.
- [37] E. Dascalaki and C. A. Balaras, "XENIOS—a methodology for assessing refurbishment scenarios and the potential of application of RES and RUE in hotels," *Energy Build.*, vol. 36, no. 11, pp. 1091–1105, Nov. 2004.
- [38] S.-M. Deng and J. Burnett, "A study of energy performance of hotel buildings in Hong Kong," *Energy Build.*, vol. 31, no. 1, pp. 7–12, Jan. 2000.
- [39] M. Karagiorgas, T. Tsoutsos, V. Drosou, S. Pouffary, T. Pagano, G. Lara, and J. Melimmendes, "HOTRES: renewable energies in the hotels. An extensive technical tool for the hotel industry," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 10, no. 3, pp. 198–224, Jun. 2006.
- [40] S. Önüt and S. Soner, "Energy efficiency assessment for the Antalya Region hotels in Turkey," *Energy Build.*, vol. 38, no. 8, pp. 964–971, Aug. 2006.
- [41] S. Becken, C. Frampton, and D. Simmons, "Energy consumption patterns in the accommodation sector—the New Zealand case," *Ecol. Econ.*, vol. 39, no. 3, pp. 371–386, Dec. 2001.
- [42] P. Bohdanowicz and I. Martinac, "Determinants and benchmarking of resource consumption in hotels—Case study of Hilton International and Scandic in Europe," *Energy Build.*, vol. 39, no. 1, pp. 82–95, Jan. 2007.

- [43] M. Bodart and A. De Herde, "Global energy savings in offices buildings by the use of daylighting," *Energy Build.*, vol. 34, no. 5, pp. 421–429, Jun. 2002.
- [44] B. Haseltine, "Comparison of energy requirements for building materials and structures," *Struct. Eng.*, vol. 53, no. 9, p. 357, 1975.
- [45] G. Baird and Chan Seong Aun, "Energy costs of houses and light construction buildings," Auckland, New Zealand, 1983.
- [46] A. H. Buchanan, "Building materials and the greenhouse effect," *New Zeal. J. Timber Constr.*, vol. 7, no. 1, pp. 6–10, 1991.
- [47] B. G. Honey and A. H. Buchanan, "Environmental impacts of the New Zealand building industry," University of Canterbury. New Zealand., 1992.
- [48] R. J. Cole and D. Rousseau, "Environmental auditing for building construction: Energy and air pollution indices for building materials," *Build. Environ.*, vol. 27, no. 1, pp. 23–30, Jan. 1992.
- [49] A. Debnath, S. V. Singh, and Y. P. Singh, "Comparative assessment of energy requirements for different types of residential buildings in India," *Energy Build.*, vol. 23, no. 2, pp. 141–146, 1995.
- [50] K. Adalberth, "Energy use during the life cycle of buildings: a method," *Build. Environ.*, 1997.
- [51] K. Adalberth, "Energy use during the life cycle of single-unit dwellings: examples," *Build. Environ.*, 1997.
- [52] G. Baird, A. Alcorn, and P. Haslam, "The Energy Embodied in Building Materials - Updated New Zealand Coefficients and Their Significance," vol. 24, no. 1, p. 46, Nov. 1997.
- [53] D. J. Harris, "A quantitative approach to the assessment of the environmental impact of building materials," *Build. Environ.*, vol. 34, no. 6, pp. 751–758, Nov. 1999.
- [54] B. . Venkatarama Reddy and K. . Jagadish, "Embodied energy of common and alternative building materials and technologies," *Energy Build.*, vol. 35, no. 2, pp. 129–137, Feb. 2003.
- [55] M. J. González and J. García Navarro, "Assessment of the decrease of CO₂ emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of three houses of low environmental impact," *Build. Environ.*, vol. 41, no. 7, pp. 902–909, Jul. 2006.
- [56] N. Mithraratne and B. Vale, "Life cycle analysis model for New Zealand houses," *Build. Environ.*, 2004.

- [57] C. Thormark, “Environmental analysis of a building with reused building materials,” *Int. J. Low Energy Sustain. Build.*, vol. 1, 2000.
- [58] E. Peris Mora, “Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building materials,” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 3, pp. 1329–1334, Mar. 2007.
- [59] C. Thormark, “A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation and recycling potential,” *Build. Environ.*, vol. 37, no. 4, pp. 429–435, Apr. 2002.
- [60] A. . Arena and C. de Rosa, “Life cycle assessment of energy and environmental implications of the implementation of conservation technologies in school buildings in Mendoza—Argentina,” *Build. Environ.*, vol. 38, no. 2, pp. 359–368, Feb. 2003.
- [61] M. D. Webster, “The Relevance of Structural Engineers to Green Building Design (ASCE),” in *Structures Congress*, 2005, pp. pp. 1–4.
- [62] K. Allacker and F. De Troyer, “Evaluation of the environmental impact of buildings, including quality and financial cost,” in *13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, 2006.
- [63] AENOR, “Norma ISO 14040:2006, Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia,” 2006. [Online]. Available: <http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0038060#.VkmXBnYvdqM>.
- [64] A. H. Buchanan and B. G. Honey, “Energy and carbon dioxide implications of building construction,” *Energy Build.*, vol. 20, no. 3, pp. 205–217, Jan. 1994.
- [65] T. Ramesh, R. Prakash, and K. K. Shukla, “Life cycle energy analysis of a residential building with different envelopes and climates in Indian context,” *Appl. Energy*, vol. 89, no. 1, pp. 193–202, 2012.
- [66] J. N. Hacker, T. P. De Saulles, A. J. Minson, and M. J. Holmes, “Embodied and operational carbon dioxide emissions from housing: A case study on the effects of thermal mass and climate change,” *Energy Build.*, vol. 40, no. 3, pp. 375–384, 2008.
- [67] A. Stephan, R. H. Crawford, and K. de Myttenaere, “Multi-scale life cycle energy analysis of a low-density suburban neighbourhood in Melbourne, Australia,” *Build. Environ.*, vol. 68, pp. 35–49, Oct. 2013.
- [68] S. Suh, M. Lenzen, G. J. Treloar, H. Hondo, A. Horvath, G. Huppes, O. Jolliet, U. Klann, W. Krewitt, Y. Moriguchi, J. Munksgaard, and G. Norris, “System Boundary Selection in Life-Cycle Inventories Using Hybrid Approaches,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 38, no. 3, pp. 657–664, Feb. 2004.
- [69] R. H. Crawford, “Validation of a hybrid life-cycle inventory analysis method,” *J. Environ. Manage.*, vol. 88, no. 3, pp. 496–506, Aug. 2008.

- [70] M. K. Dixit, J. L. Fernández-Solís, S. Lavy, and C. H. Culp, “Need for an embodied energy measurement protocol for buildings: A review paper,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 6, pp. 3730–3743, Aug. 2012.
- [71] M. K. Dixit, C. H. Culp, and J. L. Fernández-Solís, “System boundary for embodied energy in buildings: A conceptual model for definition,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 21, pp. 153–164, May 2013.
- [72] X. Oregi, P. Hernandez, C. Gazulla, and M. Isasa, “Integrating Simplified and Full Life Cycle Approaches in Decision Making for Building Energy Refurbishment: Benefits and Barriers,” *Buildings*, vol. 5, no. 2, pp. 354–380, May 2015.
- [73] R. H. Crawford, I. Czerniakowski, and R. J. Fuller, “A comprehensive model for streamlining low-energy building design,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 7, pp. 1748–1756, Jul. 2011.
- [74] A. Stephan, R. H. Crawford, and K. de Myttenaere, “Towards a comprehensive life cycle energy analysis framework for residential buildings,” *Energy Build.*, vol. 55, pp. 592–600, Dec. 2012.
- [75] F. Nemry, A. Uihlein, C. M. Colodel, C. Wetzel, A. Braune, B. Wittstock, I. Hasan, J. Kreißig, N. Gallon, S. Niemeier, and Y. Frech, “Options to reduce the environmental impacts of residential buildings in the European Union—Potential and costs,” *Energy Build.*, vol. 42, no. 7, pp. 976–984, Jul. 2010.
- [76] Z. Luo, L. Yang, and J. Liu, “Embodied Carbon Emissions of Office Building: A Case Study of China’s 78 Office Buildings,” *Build. Environ.*, vol. 95, pp. 365–371, Sep. 2015.
- [77] N. W. O. Brown, S. Olsson, and T. Malmqvist, “Embodied greenhouse gas emissions from refurbishment of residential building stock to achieve a 50% operational energy reduction,” *Build. Environ.*, vol. 79, pp. 46–56, Sep. 2014.
- [78] M. Koesling, G. Ruge, G. Fystro, T. Torp, and S. Hansen, “Embodied and operational energy in buildings on 20 Norwegian dairy farms – Introducing the building construction approach to agriculture,” *Energy Build.*, vol. 108, pp. 330–345, Dec. 2015.
- [79] “Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña (ITeC).” [Online]. Available: <http://itec.es/>.
- [80] Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña (ITeC), “BEDEC.” [Online]. Available: <http://itec.cat/nouBedec.c/bedec.aspx>.
- [81] Ministerio de Fomento y Asociación de Investigación y Cooperación Industrial de Andalucía (AICIA), “Herramienta Unificada LIDER-CALENER,” 2013. [Online]. Available: http://www.codigotecnico.org/web/recursos/aplicaciones/contenido/texto_0004.html.

- [82] Ministerio de Fomento, “Documento Básico DB HE Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación (CTE),” *Gobierno de España*, 2013. [Online]. Available: <http://www.codigotecnico.org/index.php/menu-actualidad/216-art-act-doc-basico-db-he-cte>.
- [83] Ministerio de Fomento y Asociación de Investigación y Cooperación Industrial de Andalucía (AICIA), “Programa LIDER para la Limitación de la Demanda Energética en Edificios,” 2006. [Online]. Available: http://www.codigotecnico.org/web/recursos/aplicaciones/contenido/texto_0002.html.
- [84] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) y Asociación de Investigación y Cooperación Industrial de Andalucía (AICIA), “Condiciones de aceptación de procedimientos alternativos a LIDER y CALENER,” 2009. [Online]. Available: http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/DocumentosReconocidos/OtrosDocumentos/Calificaci%C3%B3nenerg%C3%A9tica.Viviendas/Guia-8_Condiciones_Alternativos.pdf.
- [85] Lawrence Berkeley National Laboratory y el Center for Environmental Design Research de la Universidad de California, “Programa THERM. Simulación de puentes térmicos.” [Online]. Available: http://windows.lbl.gov/software/therm/7/index_7_3_2.html.
- [86] Instituto de Innovación en Arquitectura Eficiente (inARQE), “Manual de manejo de la herramienta THERM,” *Puentes Térmicos en Edificación*. [Online]. Available: <http://www.inarqe.es/publicaciones/manuales-y-gu%C3%ADAs/>.
- [87] L. Álvarez-Ude, X. Casanovas, A. Cuchí, X. Baldrich, L. García de Vinuesa, L. Díaz Feria, and F. Prats, “Análisis de los materiales empleados en la edificación en la isla de Lanzarote desde una perspectiva medioambiental. Life Lanzarote 2001-2004.,” 2004.
- [88] B. Rosselló-Batle, A. Moià, A. Cladera, and V. Martínez, “Energy use, CO2 emissions and waste throughout the life cycle of a sample of hotels in the Balearic Islands,” *Energy Build.*, vol. 42, no. 4, pp. 547–558, Apr. 2010.
- [89] A. Moià, “Programa de Eficiencia Energética en Hoteles,” *Dirección General de Energía de las Illes Balears y Universitat de les Illes Balears*, p. Dirección General de Energía de las Illes Balears, 2004.
- [90] A. Moià, “Tesis Doctoral: Diagnosi i innovació en els processos de producció i gestió energètica en equipaments turístics de les Illes Balears,” *Universitat Politècnica de Catalunya*, 2012. [Online]. Available: <http://tdx.cat/handle/10803/72205>.
- [91] Institut d’Estadística de les Illes Balears (IBESTAT), “Estadísticas de ocupación de la oferta turística,” *Conselleria de Treball, Comerç i Indústria Govern de les Illes Balears Govern de les Illes Balears*. [Online]. Available:

<http://ibestat.caib.es/ibestat/estadistiques/economia/turisme/ocupacio-oferta-turistica-hotels/614884d6-737a-401d-a8c3-a35519b8fec9>.

- [92] E. Molenbroek, E. Stricker, and T. Boermans, "Primary energy factors for electricity in buildings. Toward a flexible electricity supply.," *ECI, ECOFYS Netherlands BV, Project number: PSTRNL111077*, 2011. [Online]. Available: http://download.dalicloud.com/fis/download/66a8abe211271fa0ec3e2b07/ad5fcc2-4811-434a-8c4f-6a2daa41ad2a/Primary_energy_factors_report_ecofys_29.09.2011.pdf.
- [93] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), "Propuesta de Documento Reconocido: Factores de emisión de CO2 y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector edificios en España," *Ministerio de Fomento*, 2014. [Online]. Available: http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/propuestas/Documents/2014_03_03_Factores_de_emision_CO2_y_Factores_de_paso_Efinal_Eprimaria_V.pdf.
- [94] MINETUR, "Libro de la Energía en España," *Estadísticas y Balances Energéticos, Secretaría de Estado de Energía, Ministerio de Industria, Energía y Turismo, Gobierno de España*. [Online]. Available: <http://www.minetur.gob.es/energia/balances/Balances/Paginas/Balances.aspx>.
- [95] "Estadístiques Energètiques Illes Balears," *Conselleria de Treball, Comerç i Indústria Govern de les Illes Balears*. [Online]. Available: <http://dgener.caib.es/www/estadistiques/buscador.html>.
- [96] Red Eléctrica de España (REE), "Informe del Sistema Eléctrico Español," *Estadísticas del sistema eléctrico español. Informe Anual*. [Online]. Available: <http://www.ree.es/es/publicaciones/sistema-electrico-espanol/informe-anual>.
- [97] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), "Propuesta de Documento Reconocido. Factores de emisión de CO2 y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector edificios en España.," 2014. [Online]. Available: http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/propuestas/Documents/2014_03_03_Factores_de_emision_CO2_y_Factores_de_paso_Efinal_Eprimaria_V.pdf.
- [98] Red Eléctrica de España (REE), "Rómulo. Interconexión Eléctrica Península-Baleares." [Online]. Available: http://www.ree.es/sites/default/files/01_ACTIVIDADES/Documentos/folleto_rolulo_es.pdf.
- [99] Ministerio de Industria Turismo y Comercio, "ORDEN ITC/3801/2008, de 26 de diciembre, por la que se revisan las tarifas eléctricas a partir de 1 de enero de 2009," *Documento BOE-A-2008-21009*, 2009. [Online]. Available: <https://www.boe.es/boe/dias/2008/12/31/pdfs/A52672-52685.pdf>.

- [100] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), “Plan de Energías Renovables (PER) 2005-2010,” *Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Gobierno de España*, 2005. [Online]. Available: [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_PER_2005-2010_8_de_gosto-2005_Completo.\(modificacionpag_63\)_Copia_2_301254a0.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_PER_2005-2010_8_de_gosto-2005_Completo.(modificacionpag_63)_Copia_2_301254a0.pdf).
- [101] Asociación Española de la Industria Eléctrica (UNESA), “Prospectiva de Generación Eléctrica 2030,” 2007. [Online]. Available: <http://www.unesa.es/component/search/?searchword=prospectiva de generaci%C3%B3n el%C3%A9ctrica&searchphrase=all&Itemid=1000>.
- [102] Dr. L. Mantzos and Prof. P. Capros., “European Energy and Transport. Trends to 2030.,” *Directorate-General for Energy and Transport. European Commission*, 2006. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/trends_to_2030_update_2005.pdf.
- [103] B. Rossello-Batle, C. Ribas, a. Moia-Pol, and V. Martinez-Moll, “Saving potential for embodied energy and CO2 emissions from building elements: A case study,” *J. Build. Phys.*, 2014.
- [104] S. Li and H. Altan, “Environmental Impact Balance of Building Structures and Substitution Effect of Wood Structure in Taiwan,” *Int. J. Environ. Prot.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–7, 2012.
- [105] P. Börjesson and L. Gustavsson, “Greenhouse gas balances in building construction: wood versus concrete from life-cycle and forest land-use perspectives,” *Energy Policy*, 2000.
- [106] M. Suzuki, T. Oka, and K. Okada, “The estimation of energy consumption and CO2 emission due to housing construction in Japan,” *Energy Build.*, vol. 22, no. 2, pp. 165–169, Jan. 1995.
- [107] M. Suzuki and T. Oka, “Estimation of life cycle energy consumption and CO 2 emission of office buildings in Japan,” *Energy Build.*, 1998.
- [108] N. Huberman and D. Pearlmutter, “A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert,” *Energy Build.*, 2008.
- [109] T. Goverse, M. P. Hekkert, P. Groenewegen, E. Worrell, and R. E. H. . Smits, “Wood innovation in the residential construction sector; opportunities and constraints,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 34, no. 1, pp. 53–74, Dec. 2001.
- [110] K. Adalberth, “Tesis Doctoral: Energy use and environmental impact of new residential buildings,” *Report TVBH 1012*, 2000. [Online]. Available: <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordOId=40295&fileOId=8227876>.

- [111] O. Pons and G. Wadel, “Environmental impacts of prefabricated school buildings in Catalonia,” *Habitat Int.*, vol. 35, no. 4, pp. 553–563, Oct. 2011.
- [112] Ministerio de Fomento, “Catálogo de Elementos Constructivos del CTE,” *Secretaría de Estado de Vivienda y Actuaciones Urbanas*, 2011. [Online]. Available: <http://itec.cat/cec/>.
- [113] S. Nikoofard, V. I. Ugursal, and I. Beausoleil-Morrison, “Effect of window modifications on household energy requirement for heating and cooling in Canada,” in *Proceedings of eSim 2012: The Canadian Conference on Building Simulation*, 2012, p. 324.
- [114] Ministerio de Fomento, “Documento de Apoyo al Documento Básico DB-HE Ahorro de Energía. Código Técnico de la Edificación. DA DB-HE / 1. Cálculo de parámetros característicos de la envolvente,” *Secretaría de Estado de Infraestructuras, Transporte y Vivienda. Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo*, 2015. [Online]. Available: http://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/DA-DB-HE-1-Calculo_de_parametros_caracteristicos.pdf.
- [115] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía y AICIA, “Condiciones de aceptación de procedimientos alternativos a LIDER y CALENER.” 2009.
- [116] B. Rosselló-Batle, C. Ribas, A. Moià-Pol, and V. Martínez-Moll, “An assessment of the relationship between embodied and thermal energy demands in dwellings in a Mediterranean climate,” *Energy Build.*, vol. 109, pp. 230–244, Dec. 2015.
- [117] A. Stephan and L. Stephan, “Reducing the total life cycle energy demand of recent residential buildings in Lebanon,” *Energy*, vol. 74, pp. 618–637, Sep. 2014.
- [118] Agencia Estatal de Meteorología (AEMet). Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España., “Valores climatológicos normales. Palma de Mallorca, Aeropuerto. Periodo 1981-2010.” Madrid, 2012.
- [119] BizEE Software Limited, “BizEE Degree Days. Weather Data for Energy Professionals.” [Online]. Available: <http://www.degree-days.net/#>.
- [120] Ministerio de Fomento, “Documento de Apoyo al Documento Básico DB-HE Ahorro de Energía. DA DB-HE/3. Puentes Térmicos,” *Secretaría de Estado de Infraestructuras, Transporte y Vivienda. Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo*, 2014. .
- [121] A. Rauf and R. H. Crawford, “Building service life and its effect on the life cycle embodied energy of buildings,” *Energy*, vol. 79, pp. 140–148, Jan. 2015.
- [122] Instituto de Innovación en Arquitectura Eficiente (inARQE), “Curso Puentes Térmicos en Edificación. Cálculo de los parámetros que los caracterizan.” 2014.

- [123] AENOR, “Norma UNE-EN ISO 10211:2012. Puentes térmicos en edificación. Flujos de calor y temperaturas superficiales. Cálculos detallados. (ISO 10211:2007).” 2012.
- [124] M.I. Díaz Regodón. J.A. Tenorio Ríos. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja., “Pérdidas de calor y formación de condensaciones en los puentes térmicos de los edificios,” in *Las Jornadas de Investigación en la Construcción*, 2005.
- [125] Ministerio de Fomento, “Documento de Apoyo al Documento Básico DB-HE Ahorro de Energía. DA DB-HE/2. Comprobación de limitación de condensaciones superficiales e intersticiales en los cerramientos.,” *Secretaría de Estado de Infraestructuras, Transporte y Vivienda. Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo*, 2013. [Online]. Available: http://www.codigotecnico.org/cte/export/sites/default/web/galerias/archivos/DA-DB-HE-2_-_Condensaciones.pdf.

Anexos

Anexo I. Lista de publicaciones

1. Título: “Energy use, CO₂ emissions and waste throughout the life cycle of a sample of hotels in the Balearic Islands”. Revista: Energy and Buildings. Editorial: Elsevier. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.10.024

2. Título: “Saving potential for embodied energy and CO₂ emissions from building elements: A case study”. Revista: Journal of Building Physics. Editorial: SAGE Journals. DOI: 10.1177/1744259114543982

3. Título: “An assessment of the relationship between embodied and thermal energy demands in dwellings in a Mediterranean climate”. Revista: Energy and Buildings. Editorial: Elsevier. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.10.007

Anexo II. Tablas complementarias del Capítulo 1

Tabla II. 1. Factores de conversión de energía final a energía primaria y a emisiones de CO₂ para el consumo eléctrico en Baleares. Periodo 2012-2030.

Año	Factor de conversión de energía final a energía primaria (kWh e.p./kWh e.f.)	Factor de conversión de energía final a emisiones de CO₂ (kgCO₂/kWh e.f.)
2012	3,276	0,900
2013	3,113	0,796
2014	3,083	0,806
2015	3,075	0,798
2016	3,067	0,791
2017	3,059	0,783
2018	3,051	0,775
2019	3,043	0,768
2020	3,035	0,759
2021	3,026	0,751
2022	3,018	0,743
2023	3,009	0,734
2024	3,001	0,726
2025	2,992	0,717
2026	2,984	0,708
2027	2,975	0,621
2028	2,966	0,693
2029	2,957	0,683
2030	2,949	0,674

Tabla II. 2. Estimación de las emisiones de CO₂ en el hotel 1.

Año	Hotel 1		
	Estimación emisiones de CO ₂		
	Electricidad	GLP/gas natural (kgCO ₂)	Gasoil
1980	1.380.281	39.156	143.412
1981	1.382.201	39.211	143.612
1982	1.376.442	39.047	143.014
1983	1.293.894	36.706	134.437
1984	1.217.105	34.527	126.458
1985	1.336.128	37.904	138.825
1986	1.347.646	38.230	140.022
1987	1.191.764	33.808	123.825
1988	1.255.883	35.627	130.487
1989	1.228.047	34.838	127.595
1990	1.336.128	37.904	138.825
1991	1.347.646	38.230	140.022
1992	1.191.764	33.808	123.825
1993	1.255.883	35.627	130.487
1994	1.228.047	34.838	127.595
1995	1.469.058	41.863	153.326
1996	1.339.339	38.721	141.817
1997	1.508.997	43.878	160.706
1998	1.652.385	45.343	166.073
1999	1.622.767	45.407	166.304
2000	1.582.263	45.217	165.612
2001	1.505.531	42.506	155.679
2002	1.382.558	39.983	146.440
2003	1.482.537	43.893	160.761
2004	1.481.661	44.271	162.147

2005	1.331.748	40.755	155.382
2006	1.403.398	42.948	151.106
2007	1.372.292	41.996	147.757
2008	820.450	92.608	-
2009	758.865	85.657	-
2010	859.941	97.065	-
2011	888.118	100.246	-
2012	841.024	101.246	-
2013	702.328	95.550	-
2014	704.145	94.692	-
2015	710.361	96.409	-
2016	592.669	81.199	-
2017	552.107	76.380	-
2018	600.074	83.849	-
2019	599.059	84.572	-
2020	524.196	74.790	-
2021	546.427	78.814	-
2022	528.375	77.067	-
2023	627.666	92.608	-
2024	573.725	85.657	-
2025	642.279	97.065	-
2026	655.073	100.246	-
2027	579.946	101.246	-
2028	610.814	95.550	-
2029	597.225	94.692	-
2030	599.676	96.409	-

Tabla II. 3. Estimación de las emisiones de CO₂ en el hotel 2.

Hotel 2			
Estimación emisiones de CO₂			
Año	Electricidad	GLP/gas natural (kgCO₂)	Gasoil
1980	2.019.251	62.349	385.459
1981	2.022.059	62.435	385.995
1982	2.013.634	62.175	384.387
1983	1.892.872	58.446	361.334
1984	1.780.536	54.978	339.890
1985	1.954.657	60.354	373.129
1986	1.971.508	60.874	376.345
1987	1.743.465	53.833	332.813
1988	1.837.266	56.729	350.719
1989	1.796.544	55.472	342.946
1990	1.954.657	60.354	373.129
1991	1.971.508	60.874	376.345
1992	1.743.465	53.833	332.813
1993	1.837.266	56.729	350.719
1994	1.796.544	55.472	342.946
1995	2.149.125	66.658	412.103
1996	1.959.355	61.655	381.170
1997	2.207.553	69.867	431.939
1998	2.586.718	77.260	477.647
1999	2.540.353	77.368	478.311
2000	2.476.947	77.045	476.318
2001	2.356.827	72.425	447.752
2002	2.164.318	68.126	421.179
2003	2.320.830	74.789	462.367
2004	2.319.460	75.433	466.353

2005	2.084.778	69.442	446.898
2006	2.196.943	73.178	434.599
2007	2.148.249	71.556	424.966
2008	1.232.490	139.117	-
2009	1.139.977	128.674	-
2010	1.291.814	145.813	-
2011	1.334.142	150.591	-
2012	1.263.396	152.093	-
2013	1.055.047	143.537	-
2014	1.057.775	142.248	-
2015	1.067.113	144.827	-
2016	890.315	121.978	-
2017	829.382	114.739	-
2018	901.438	125.960	-
2019	899.914	127.046	-
2020	787.454	112.350	-
2021	820.849	118.395	-
2022	793.731	115.771	-
2023	942.887	139.117	-
2024	861.857	128.674	-
2025	964.839	145.813	-
2026	984.058	150.591	-
2027	871.202	152.093	-
2028	917.572	143.537	-
2029	897.159	142.248	-
2030	900.841	144.827	-

Anexo III. Tablas complementarias del Capítulo 3

Tabla III. 1. Valores de demanda energética obtenidos para la vivienda aislada, entre medianeras y en bloque evaluadas con la Herramienta Unificada LIDER-CALENER.

Tipología	Escenarios	Subescenarios	Descripción	Con puente térmico en frentes de forjado			
				Demanda de calefacción	Demanda de refrigeración	Demanda de calefacción	Demanda de refrigeración
VIVIENDA AISLADA	Esc. 1.0.	Caso base ₁	MW	19,82	15,05	14,89	14,17
	Esc. 1.1.	Subesc. 1.1.1.	EPS	19,51	15,05	14,63	14,18
		Subesc. 1.1.2.	PUR	18,39	14,96	13,75	14,14
	Esc. 1.2.	Subesc. 1.2.1.	MW+CUB.PL.C1	15,91	14,23	12,99	13,72
		Subesc. 1.2.2.	MW+CUB.PL.C2	15,55	14,94	12,59	14,44
	Esc. 1.3.	Subesc. 1.3.1.	AISL. EXT. XPS	15,15	13,55	15,15	13,55
		Subesc. 1.3.2.	AISL. EXT. PUR	13,61	14,05	13,61	14,05
	Esc. 1.4.	Subesc. 1.4.1.	MW+LC	21,25	15,07	15,89	14,15
		Subesc. 1.4.2.	EPS+LC	20,74	15,05	15,49	14,15
		Subesc. 1.4.3.	PUR+LC	19,17	14,96	14,29	14,11
		Subesc. 1.4.4.	MW+LC+CUB.PL.C1	16,98	14,25	14,06	13,71
		Subesc. 1.4.5.	MW+LC+CUB.PL.C2	16,71	14,95	13,68	14,43

		Subesc. 1.4.6.	AISL. EXT. XPS+LC	15,96	13,12	15,96	13,12
		Subesc. 1.4.7.	AISL. EXT. PUR+LC	14,04	13,75	14,04	13,75
	Esc. 1.5.	Subesc. 1.5.1.	MARC.PVC	19,68	15,08	14,75	14,2
		Subesc. 1.5.2.	MARC.METÁL.	20,92	14,99	15,78	14,1
	Esc. 2.0.	Caso base ₂	MW	11,61	8,22	9,1	7,64
	Esc. 2.1.	Subesc. 2.1.1.	EPS	11,46	8,22	8,95	7,64
		Subesc. 2.1.2.	PUR	11	8,17	8,27	7,61
	Esc. 2.2.	Subesc. 2.2.1.	MW+CUB.PL.C1	7,98	7,89	6,23	7,5
		Subesc. 2.2.2.	MW+CUB.PL.C2	8,05	7,93	6,43	7,7
	Esc. 2.3.	Subesc. 2.3.1.	AISL. EXT. XPS	9,05	7,6	9,05	7,6
		Subesc. 2.3.2.	AISL. EXT. PUR	8,3	7,57	8,3	7,57
	Esc. 2.4.	Subesc. 2.4.1.	MW+LC	12,51	8,25	9,51	7,65
		Subesc. 2.4.2.	EPS+LC	12,22	8,24	9,35	7,64
		Subesc. 2.4.3.	PUR+LC	11,3	8,19	8,85	7,61
		Subesc. 2.4.4.	MW+LC+CUB.PL.C1	8,43	7,92	7,02	7,69
		Subesc. 2.4.5.	MW+LC+CUB.PL.C2	9,22	8,06	7,49	7,83
		Subesc. 2.4.6.	AISL. EXT. XPS+LC	9,46	7,54	9,46	7,54
		Subesc. 2.4.7.	AISL. EXT. PUR+LC	8,58	7,5	8,58	7,5
	Esc. 2.5.	Subesc. 2.5.1.	MARC.PVC	11,52	8,23	8,99	7,65
		Subesc. 2.5.2.	MARC.METÁL.	12,55	8,22	9,62	7,64
	Esc. 3.0.	Caso base ₃	MW	4,46	7,44	2,9	7,05
	Esc. 3.1.	Subesc. 3.1.1.	EPS	4,21	7,41	2,83	7,02
		Subesc. 3.1.2.	PUR	4,29	7,43	2,58	6,8
	Esc. 3.2.	Subesc. 3.2.1.	MW+CUB.PL.C1	-	-	-	-
		Subesc. 3.2.2.	MW+CUB.PL.C2	-	-	-	-
	Esc. 3.3.	Subesc. 3.3.1.	AISL. EXT. XPS	0,3	6,16	0,3	6,16
		Subesc. 3.3.2.	AISL. EXT. PUR	0,16	6,14	0,16	6,14
	Esc. 3.4.	Subesc. 3.4.1.	MW+LC	5,17	7,51	3,32	7,06

**VIVIENDA
ENTRE
MEDIANERAS**

**VIVIENDA EN
BLOQUE**

		Subesc. 3.4.2.	EPS+LC	5,01	7,44	3,08	7,04
		Subesc. 3.4.3.	PUR+LC	4,2	7,4	2,84	7,01
		Subesc. 3.4.4.	MW+LC+CUB.PL.C1	-	-	-	-
		Subesc. 3.4.5.	MW+LC+CUB.PL.C2	-	-	-	-
		Subesc. 3.4.6.	AISL. EXT. XPS+LC	0,49	6,1	0,49	6,1
		Subesc. 3.4.7.	AISL. EXT. PUR+LC	0,28	6,07	0,28	6,07
	Esc. 3.5.	Subesc. 3.5.1.	MARC.PVC	4,26	7,42	2,86	7,03
		Subesc. 3.5.2.	MARC.METÁL.	5,15	7,4	3,32	7,01
	Esc. 3.0.	Caso base_3_pilares aislados	MW	0,67	6,58	0,3	6,39
	Esc. 3.1.	Subesc. 3.1.1.*	EPS	0,65	6,56	0,29	6,36
		Subesc. 3.1.2.*	PUR	0,66	6,52	0,16	6,17
	Esc. 3.2.	Subesc. 3.2.1.*	MW+CUB.PL.C1	-	-	-	-
		Subesc. 3.2.2.*	MW+CUB.PL.C2	-	-	-	-
	Esc. 3.3.	Subesc. 3.3.1.*	AISL. EXT. XPS	0,3	6,16	0,3	6,16
		Subesc. 3.3.2.*	AISL. EXT. PUR	0,16	6,14	0,16	6,14
		Subesc. 3.4.1.*	MW+LC	1,16	6,58	0,5	6,38
		Subesc. 3.4.2.*	EPS+LC	1,1	6,57	0,47	6,37
		Subesc. 3.4.3.*	PUR+LC	0,58	6,53	0,28	6,34
	Esc. 3.4.	Subesc. 3.4.4.*	MW+LC+CUB.PL.C1	-	-	-	-
		Subesc. 3.4.5.*	MW+LC+CUB.PL.C2	-	-	-	-
		Subesc. 3.4.6.*	AISL. EXT. XPS+LC	0,49	6,1	0,49	6,1
		Subesc. 3.4.7.*	AISL. EXT. PUR+LC	0,28	6,07	0,28	6,07
	Esc. 3.5.	Subesc. 3.5.1.*	MARC.PVC	0,66	6,57	0,3	6,37
		Subesc. 3.5.2.*	MARC.METÁL.	1,28	6,54	0,52	6,34

VIVIENDA EN BLOQUE con pilares aislados

Tipología	Escenarios	Subescenarios	Descripción	Demanda de calefacción (kWh/m ²)	Demanda de refrigeración (kWh/m ²)	Var. IEE (kWh/m ²)	Var. IE _{CO₂} (kg/m ²)	Demanda de calefacción (kWh/m ²)	Demanda de refrigeración (kWh/m ²)	Var. IEE (kWh/m ²)	Var. IE _{CO₂} (kg/m ²)
VIVIENDA AISLADA	Esc. 1.0.	Caso base ₁	MW	19,82	15,05	0,00	-	14,89	14,17	2,88	0,66
	Esc. 1.1.	Subesc. 1.1.1.	EPS	19,51	15,05	33,65	26,18	14,63	14,18	40,07	29,59

		Subesc. 1.1.2. PUR	18,39	14,96	100,42	61,65	13,75	14,14	113,86	68,79
Esc. 1.2.		Subesc. 1.2.1. MW+CUB.PL.C1	15,91	14,23	-43,43	-12,15	12,99	13,72	-41,99	-11,82
		Subesc. 1.2.2. MW+CUB.PL.C2	15,55	14,94	-43,78	-16,22	12,59	14,44	-42,34	-15,89
Esc. 1.3.		Subesc. 1.3.1. AISL. EXT. XPS	15,15	13,55	88,08	73,24	15,15	13,55	88,08	73,24
		Subesc. 1.3.2. AISL. EXT. PUR	13,61	14,05	26,96	40,80	13,61	14,05	26,96	40,80
Esc. 1.4.		Subesc. 1.4.1. MW+LC	21,25	15,07	-4,84	-16,58	15,89	14,15	-2,03	-15,94
		Subesc. 1.4.2. EPS+LC	20,74	15,05	28,90	9,67	15,49	14,15	35,15	12,99
		Subesc. 1.4.3. PUR+LC	19,17	14,96	95,85	37,85	14,29	14,11	108,95	52,19
		Subesc. 1.4.4. MW+LC+CUB.PL.C1	16,98	14,25	-48,78	-28,71	14,06	13,71	-47,38	-28,39
		Subesc. 1.4.5. MW+LC+CUB.PL.C2	16,71	14,95	-49,13	-32,78	13,68	14,43	-47,73	-32,46
		Subesc. 1.4.6. AISL. EXT. XPS+LC	15,96	13,12	83,43	56,75	15,96	13,12	83,43	56,75
		Subesc. 1.4.7. AISL. EXT. PUR+LC	14,04	13,75	22,31	24,30	14,04	13,75	22,31	24,30
Esc. 1.5.		Subesc. 1.5.1. MARC.PVC	19,68	15,08	102,29	50,99	14,75	14,20	105,17	51,65
		Subesc. 1.5.2. MARC.METÁL.	20,92	14,99	198,08	105,98	15,78	14,10	200,96	106,64
Esc. 2.0.	Caso base ₂	MW	11,61	8,22	-30,93	-9,94	9,10	7,64	-29,40	-9,59
Esc. 2.1.		Subesc. 2.1.1. EPS	11,46	8,22	-14,16	3,10	8,95	7,64	-10,74	4,92
		Subesc. 2.1.2. PUR	11	8,17	19,11	20,78	8,27	7,61	26,29	24,59
Esc. 2.2.		Subesc. 2.2.1. MW+CUB.PL.C1	7,98	7,89	-86,08	-26,11	6,23	7,50	-84,55	-25,75
		Subesc. 2.2.2. MW+CUB.PL.C2	8,05	7,93	-86,43	-30,17	6,43	7,70	-84,90	-29,82
Esc. 2.3.		Subesc. 2.3.1. AISL. EXT. XPS	9,05	7,6	12,61	26,50	9,05	7,60	12,61	26,50
		Subesc. 2.3.2. AISL. EXT. PUR	8,3	7,57	-18,05	10,22	8,30	7,57	-18,05	10,22
Esc. 2.4.		Subesc. 2.4.1. MW+LC	12,51	8,25	-34,25	-18,53	9,51	7,65	-32,71	-18,18
		Subesc. 2.4.2. EPS+LC	12,22	8,24	-17,48	-5,48	9,35	7,64	-14,05	-3,66
		Subesc. 2.4.3. PUR+LC	11,3	8,19	15,80	12,20	8,85	7,61	22,97	16,01
		Subesc. 2.4.4. MW+LC+CUB.PL.C1	8,43	7,92	-89,40	-34,69	7,02	7,69	-87,86	-34,34
		Subesc. 2.4.5. MW+LC+CUB.PL.C2	9,22	8,06	-89,75	-38,76	7,49	7,83	-88,21	-38,41
		Subesc. 2.4.6. AISL. EXT. XPS+LC	9,46	7,54	9,30	17,92	9,46	7,54	9,30	17,92
		Subesc. 2.4.7. AISL. EXT. PUR+LC	8,58	7,5	-21,37	1,64	8,58	7,50	-21,37	1,64
Esc. 2.5.		Subesc. 2.5.1. MARC.PVC	11,52	8,23	37,82	24,32	8,99	7,65	39,36	24,67
		Subesc. 2.5.2. MARC.METÁL.	12,55	8,22	102,15	61,25	9,62	7,64	103,68	61,61

VIVIENDA
ENTRE
MEDIANERAS

VIVIENDA EN BLOQUE	Esc. 3.0.	Caso base ₃	MW	4,46	7,44	-75,30	-35,05	2,90	7,05	-74,53	-34,88
	Esc. 3.1.	Subesc. 3.1.1.	EPS	4,21	7,41	-58,94	-22,32	2,83	7,02	-57,23	-21,41
		Subesc. 3.1.2.	PUR	4,29	7,43	-26,47	-5,08	2,58	6,80	-22,89	-3,17
	Esc. 3.3.	Subesc. 3.3.1.	AISL. EXT. XPS	0,3	6,16	-42,09	-3,32	0,30	6,16	-42,09	-3,32
		Subesc. 3.3.2.	AISL. EXT. PUR	0,16	6,14	-72,08	-19,24	0,16	6,14	-72,08	-19,24
	Esc. 3.4.	Subesc. 3.4.1.	MW+LC	5,17	7,51	-84,25	-45,80	3,32	7,06	-83,48	-45,63
		Subesc. 3.4.2.	EPS+LC	5,01	7,44	-67,89	-33,07	3,08	7,04	-66,18	-32,16
		Subesc. 3.4.3.	PUR+LC	4,2	7,4	-35,42	-15,83	2,84	7,01	-31,84	-13,92
		Subesc. 3.4.6.	AISL. EXT. XPS+LC	0,49	6,1	-51,04	-14,06	0,49	6,10	-51,04	-14,06
		Subesc. 3.4.7.	AISL. EXT. PUR+LC	0,28	6,07	-81,03	-29,99	0,28	6,07	-81,03	-29,99
	Esc. 3.5.	Subesc. 3.5.1.	MARC.PVC	4,26	7,42	-2,39	1,35	2,86	7,03	-1,62	1,52
		Subesc. 3.5.2.	MARC.METÁL.	5,15	7,4	66,54	40,88	3,32	7,01	67,31	41,06
	VIVIENDA EN BLOQUE_con pilares aislados	Esc. 3.0.*	Caso base ₃ _pilares aislados	MW	0,67	6,58	-74,34	-34,84	0,30	6,39	-73,57
Esc. 3.1.*		Subesc. 3.1.1.*	EPS	0,65	6,56	-56,80	-21,19	0,29	6,36	-55,09	-20,28
		Subesc. 3.1.2.*	PUR	0,66	6,52	-22,00	-2,70	0,16	6,17	-18,41	-0,79
Esc. 3.3.*		Subesc. 3.3.1.*	AISL. EXT. XPS	0,3	6,16	-42,09	-3,32	0,30	6,16	-42,09	-3,32
		Subesc. 3.3.2.*	AISL. EXT. PUR	0,16	6,14	-72,08	-19,24	0,16	6,14	-72,08	-19,24
Esc. 3.4.*		Subesc. 3.4.1.*	MW+LC	1,16	6,58	-83,29	-45,58	0,50	6,38	-82,52	-45,41
		Subesc. 3.4.2.*	EPS+LC	1,1	6,57	-65,75	-31,94	0,47	6,37	-64,04	-31,03
		Subesc. 3.4.3.*	PUR+LC	0,58	6,53	-30,95	-13,45	0,28	6,34	-27,36	-11,54
Esc. 3.5.*		Subesc. 3.4.6.*	AISL. EXT. XPS+LC	0,49	6,1	-51,04	-14,06	0,49	6,10	-51,04	-14,06
		Subesc. 3.4.7.*	AISL. EXT. PUR+LC	0,28	6,07	-81,03	-29,99	0,28	6,07	-81,03	-29,99
		Subesc. 3.5.1.*	MARC.PVC	0,66	6,57	-1,43	1,57	0,30	6,37	-0,66	1,74
		Subesc. 3.5.2.*	MARC.METÁL.	1,28	6,54	67,50	41,10	0,52	6,34	68,27	41,28

