

## Tesis Doctoral

Adaptación de la metodología del análisis de ciclo de vida para la evaluación y la mejora del impacto energético y ambiental de la edificación en España

Autor

Ignacio Zabalza Bribián

Director/es

Jose Alfonso Aranda Usón  
Antonio Félix Valero Capilla

Departamento de Ingeniería Mecánica  
2011



Instituto Universitario  
de Investigación Mixta  
CIRCE

Universidad Zaragoza



Departamento de  
Ingeniería Mecánica

Universidad Zaragoza

Tesis Doctoral  
Universidad de Zaragoza

# ADAPTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA PARA LA EVALUACIÓN Y LA MEJORA DEL IMPACTO ENERGÉTICO Y AMBIENTAL DE LA EDIFICACIÓN EN ESPAÑA



**Ignacio Zabalza Bribián**

**DIRECTORES:**

Antonio Valero Capilla  
José Alfonso Aranda Usón

**Octubre 2010**



Instituto Universitario  
de Investigación Mixto

**CIRCE**

**Universidad Zaragoza**



**Departamento de  
Ingeniería Mecánica**

**Universidad Zaragoza**

Departamento de Ingeniería Mecánica  
Universidad de Zaragoza

# Adaptación de la metodología del análisis de ciclo de vida para la evaluación y la mejora del impacto energético y ambiental de la edificación en España

Tesis Doctoral  
Ignacio Zabalza Bribián

Directores:

Antonio Valero Capilla  
José Alfonso Aranda Usón

Octubre 2010



El Dr. Antonio Valero Capilla, Catedrático del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza y Director del Instituto Universitario de Investigación CIRCE, y el Dr. José Alfonso Aranda Usón, Profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza y Subdirector del Área de Eficiencia Energética del Instituto Universitario de Investigación CIRCE

CERTIFICAN:

Que la memoria titulada **“Adaptación de la metodología del análisis de ciclo de vida para la evaluación y la mejora del impacto energético y ambiental de la edificación en España”**, presentada por D. Ignacio Zabalza Bribián para optar al grado de Doctor ha sido realizada bajo su dirección.

Zaragoza, Octubre de 2010



Fdo: Dr. Antonio Valero Capilla



Fdo: Dr. José Alfonso Aranda Usón



---

# AGRADECIMIENTOS

---

Quiero dedicar estas primeras líneas a dar las gracias a todas aquellas personas que han ayudado a que esta tesis doctoral se materialice:

A mi director de tesis, el Dr. Antonio Valero por apoyar y guiar con inteligencia, tesón y rigor mi carrera como científico-investigador, por su entusiasmo en este proyecto, y por los numerosos y valiosos consejos y orientaciones recibidos, que han aportado un sello de seriedad y rigor a este trabajo.

A mi codirector de tesis, el Dr. Alfonso Aranda, por los consejos recibidos durante todos estos años de trabajo que hemos compartido, así como por su visión, rigor y eficaz capacidad de gestión que aporta a todos los trabajos en los que participa.

A todos mis compañeros de la División de Eficiencia Energética de CIRCE, por el enriquecedor aprendizaje que ha supuesto trabajar con todos ellos así como por el soporte y apoyo que me han proporcionado, permitiendo que este proyecto se haya convertido en una realidad. A Francisco Barrio y su grupo de trabajo, por su ayuda en la búsqueda de datos y las simulaciones realizadas, a Sergio Díaz de Garaio por su experiencia en la simulación energética, su visión de la arquitectura sostenible, y los datos proporcionados del edificio CIRCE y las parcelas de Valdespartera, a Abel Ortego por su ayuda en el trabajo de campo y su eficaz gestión y tratamiento de los planos utilizados, y, especialmente a Sabina Scarpellini, por su confianza y apoyo incondicional durante los más de 11 años que llevo trabajando en CIRCE, abriendo una nueva línea de investigación con los proyectos europeos ENSLIC y LoRE-LCA, y estimulando el desarrollo profesional de todo el personal que le rodea, con dedicación, esfuerzo y rigor.

Y por último, en el ámbito más personal, agradecer a mi familia y a todas aquellas personas, que aún no siendo nombradas, han contribuido a que esta tesis haya salido adelante.





---

*“... los edificios estarán dispuestos adecuadamente si se han tenido en cuenta ante todo las orientaciones y las inclinaciones del cielo en el lugar donde se desea construirlos; porque no deben ser construidos de la misma manera en Egipto que en España. (...) Al estar el aspecto del cielo inclinado en una forma distinta con respecto a los diferentes lugares, a causa de la inclinación que tienen con el zodiaco y con el curso del sol, es necesario disponer los edificios en razón de la diversidad de los países y de los climas.”*

Marcus Vitruvius Pollio, Arquitecto romano (siglo I a.C.) Libro VI, Capítulo I



# INDICE

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN. EDIFICACIÓN Y EFICIENCIA ENERGÉTICA .....</b>	<b>1</b>
1.1.SITUACIÓN ACTUAL DEL SECTOR DE LA EDIFICACIÓN EN ESPAÑA .....	6
1.2.LÍNEAS DE ACTUACIÓN EN EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA EDIFICACIÓN .....	17
1.2.1. <i>Iniciativas internacionales</i> .....	19
1.2.2. <i>Iniciativas y marco legislativo regulador en Europa</i> .....	22
1.2.3. <i>Iniciativas y marco legislativo regulador en España</i> .....	27
1.3.JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DE LA TESIS .....	36
1.4.CONTENIDO DE LA TESIS .....	39
<b>CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN LA EDIFICACIÓN .....</b>	<b>43</b>
2.1.LOS ORÍGENES Y DESARROLLO DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA .....	44
2.2.INICIATIVAS Y PROYECTOS DESARROLLADOS DE ACV EN LA EDIFICACIÓN .....	46
2.2.1. <i>Proyecto REGENER</i> .....	46
2.2.2. <i>International Energy Agency-Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme -Annex 3I</i> .....	47
2.2.3. <i>NAHB Workshop</i> .....	47
2.2.4. <i>Estudio sobre herramientas de ACV y Declaraciones Ambientales de Producto</i> .	48
2.2.5. <i>Life Cycle Initiative – Grupo de trabajo de ACV en construcción y edificación</i> ...	48
2.2.6. <i>Red Temática Europea PRESCO</i> .....	49
2.2.7. <i>Proyecto CALCAS</i> .....	50
2.2.8. <i>Proyecto IMPRO-Building</i> .....	50
2.2.9. <i>Proyecto ENSLIC</i> .....	51
2.2.10. <i>Proyecto LoRe-LCA</i> .....	52
2.2.11. <i>COST Action C25</i> .....	52
2.3.ESTUDIOS PUBLICADOS DE ACV EN LA EDIFICACIÓN .....	53
2.4.METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA .....	62
2.4.1. <i>Definición de objetivos y alcance</i> .....	63
2.4.2. <i>Análisis de inventario</i> .....	66
2.4.3. <i>Evaluación de impactos</i> .....	66
2.4.4. <i>Interpretación de resultados</i> .....	68
2.4.5. <i>Tipologías de ACV</i> .....	69
2.5.DATOS DE INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA .....	71
2.5.1. <i>Bases de Datos</i> .....	71
2.5.2. <i>Ecoetiquetas y Declaraciones Ambientales de Producto</i> .....	75
2.6.INDICADORES MEDIOAMBIENTALES Y METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE IMPACTO ....	78
2.7.HERRAMIENTAS ACTUALES DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS COMPARATIVO .....	94
2.7.1. <i>Herramientas generales de ACV</i> .....	95
2.7.2. <i>Herramientas específicas de ACV en edificios</i> .....	99
2.8.OPORTUNIDADES DEL USO DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN EL SECTOR DE LA EDIFICACIÓN .....	107
2.8.1. <i>El ACV y el sector de la edificación en España</i> .....	109
2.9.CONCLUSIONES .....	112
<b>CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN .....</b>	<b>115</b>
3.1.METODOLOGÍA .....	118
3.1.1. <i>Unidad funcional</i> .....	118
3.1.2. <i>Categorías de impacto</i> .....	118
3.1.3. <i>Metodologías de evaluación de impacto</i> .....	118
3.1.4. <i>Bases de datos y requisitos de calidad de datos</i> .....	119

3.1.5. <i>Etapas consideradas en el ciclo de vida de los materiales de construcción</i> .....	120
3.1.6. <i>Modelización de las curvas de ahorro-inversión</i> .....	121
3.2. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMPARATIVO DE DIVERSOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.....	122
3.2.1. <i>Ladrillos, baldosas y tejas</i> .....	123
3.2.2. <i>Aislamientos térmicos</i> .....	141
3.2.3. <i>Cemento y hormigón</i> .....	155
3.2.4. <i>Maderas</i> .....	167
3.2.5. <i>Materiales comunes</i> .....	176
3.3. EL IMPACTO DEL TRANSPORTE .....	192
3.4. CONCLUSIONES .....	200
<b>CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE EDIFICIOS: METODOLOGÍA, APLICACIÓN Y SIMPLIFICACIONES POSIBLES.....</b>	<b>217</b>
4.1. METODOLOGÍA.....	218
4.1.1. <i>Unidad funcional</i> .....	218
4.1.2. <i>Categorías de impacto y metodologías de evaluación de impacto</i> .....	218
4.1.3. <i>Bases de datos y requisitos de calidad de datos</i> .....	218
4.1.4. <i>Etapas consideradas en el ciclo de vida del edificio</i> .....	219
4.1.5. <i>Producción del edificio</i> .....	220
4.1.6. <i>Construcción del edificio</i> .....	222
4.1.7. <i>Uso del edificio</i> .....	224
4.1.8. <i>Fin de vida del edificio</i> .....	233
4.2. EDIFICIO RESIDENCIAL Nº 1 .....	234
4.2.1. <i>Descripción general del edificio</i> .....	234
4.2.2. <i>Datos de entrada</i> .....	236
4.3. EDIFICIO RESIDENCIAL Nº 2 .....	244
4.3.1. <i>Descripción general del edificio</i> .....	244
4.3.2. <i>Datos de entrada</i> .....	245
4.4. EDIFICIO DE OFICINAS/I+D.....	253
4.4.1. <i>Descripción general del edificio</i> .....	253
4.4.2. <i>Datos de entrada</i> .....	257
4.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	267
4.5.1. <i>Energía incorporada total</i> .....	267
4.5.2. <i>Potencial de calentamiento global</i> .....	272
4.5.3. <i>Huella hídrica</i> .....	276
4.5.4. <i>Puntuación única</i> .....	277
4.5.5. <i>Análisis de ciclo de vida simplificado</i> .....	281
4.6. AMPLIACIÓN DEL ACV A NIVEL DE URBANIZACIÓN .....	282
4.6.1. <i>La productividad primaria neta potencial</i> .....	282
4.6.2. <i>Las infraestructuras de abastecimiento de agua</i> .....	283
4.6.3. <i>Las infraestructuras de suministro energético</i> .....	284
4.6.4. <i>Las infraestructuras para la movilidad</i> .....	285
4.6.5. <i>El impacto de la movilidad urbana</i> .....	286
4.7. CONCLUSIONES .....	295
<b>CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN DE MEDIDAS DE ECOEFICIENCIA PARA EL SECTOR DE LA EDIFICACIÓN RESIDENCIAL EN ESPAÑA .....</b>	<b>305</b>
5.1. DEFINICIÓN DE LOS MODELOS DE EDIFICACIÓN RESIDENCIAL .....	306
5.1.1. <i>Modelo de vivienda unifamiliar</i> .....	307
5.1.2. <i>Modelo de bloque de viviendas</i> .....	310
5.2. EVALUACIÓN DE MEDIDAS PARA LA DISMINUCIÓN DEL IMPACTO ENERGÉTICO Y MEDIOAMBIENTAL EN LOS MODELOS CONSIDERADOS .....	313
5.2.1. <i>Orientación correcta de la fachada principal del edificio</i> .....	313
5.2.2. <i>Elección adecuada de las tasas de ventilación</i> .....	316
5.2.3. <i>Selección correcta de los sistemas energéticos activos</i> .....	319
5.2.4. <i>Sustitución del enfriamiento convencional por enfriamiento evaporativo</i> .....	323
5.2.5. <i>Ecodiseño de la envolvente térmica del edificio</i> .....	325
5.2.6. <i>Adecuación de la forma y tamaño del edificio</i> .....	345

---

5.2.7. <i>Disminución de las necesidades de transporte de los materiales de construcción</i> .....	347
5.2.8. <i>Disminución y mejora de la movilidad urbana</i> .....	349
5.3. EXTRAPOLACIÓN DE RESULTADOS AL SECTOR DE LA EDIFICACIÓN RESIDENCIAL EN ESPAÑA. CURVAS AHORRO - INVERSIÓN .....	352
5.3.1. <i>Modelización de las curvas de ahorro-inversión</i> .....	355
5.4. CONCLUSIONES .....	362
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES</b> .....	<b>377</b>
6.1. SÍNTESIS DE LA TESIS .....	377
6.2. CONTRIBUCIONES CIENTÍFICAS DE LA TESIS .....	389
6.3. PERSPECTIVAS .....	395
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>399</b>
<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>431</b>
<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	<b>441</b>



# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN. EDIFICACIÓN Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

---

A principios de la década de los 70, un grupo del Massachusetts Institute of Technology, liderado por el profesor Dennis Meadows, puso ya en evidencia la relación existente entre el crecimiento económico y el deterioro ecológico (Meadows D.L., et al., 1972).

En la actualidad, el uso racional y eficiente de la energía así como de los recursos naturales constituye una prioridad indiscutible y necesaria, no sólo en el ámbito regional o nacional, sino también a escala mundial. De hecho, forma parte de las principales estrategias y decisiones políticas que afectan al desarrollo económico y social y al impacto ambiental, tanto de los países desarrollados como de aquellos en vías de desarrollo que padecen la sobreexplotación de los primeros.

El equilibrio necesario entre la calidad de vida de la sociedad, y de las personas en particular, la afección e impacto al medio natural y el desarrollo económico y tecnológico complica la situación de forma apreciable. Si a estos cuatro factores se suma la inestabilidad política en muchos de los países que gozan de extraordinarios recursos naturales y energéticos, el resultado es ciertamente muy preocupante en un horizonte próximo de unas pocas décadas.

Esta simple reflexión evidencia la responsabilidad que principalmente recae en los países más desarrollados por velar y garantizar un futuro que considere a dónde nos lleva la explotación actual del medio natural y cómo hemos de afrontarla a fin de mantener dicho equilibrio. El desarrollo sostenible, término acuñado por Gro Harlem Brundtland (WCED, 1987), es cada vez más una necesidad, a pesar de que el actual uso de este término, en muchas ocasiones de un modo retórico y banal, está contribuyendo a vaciarlo de su contenido y significado original.

Desde una perspectiva globalizada, los macro-sectores económicos como el transporte, la energía y la construcción, suman y aglutinan la inmensa mayoría de los impactos energéticos y medioambientales. Principalmente este último, por su carácter difuso y atomizado, presenta particulares dificultades en el análisis, evaluación e identificación de las posibilidades de disminución de su impacto.

La construcción es una de las actividades humanas más devastadoras desde el punto de vista medioambiental. Consume el 60% de las materias primas de la litosfera, el 12% del agua y produce el 50% de las emisiones de CO<sub>2</sub>, teniendo en cuenta la construcción y el uso de los edificios (Martí i Ragué X., 2003). Por todo ello, la edificación necesita reinventarse y recordarse; un cambio de paradigma en el modo de planificar el territorio y sus edificios; convirtiendo los procesos lineales de producción de los materiales utilizados por el sector en ciclos cerrados de uso, reutilización, reciclado y devolución de los recursos, siguiendo los principios de la ecología industrial (Graedel T., 1994).

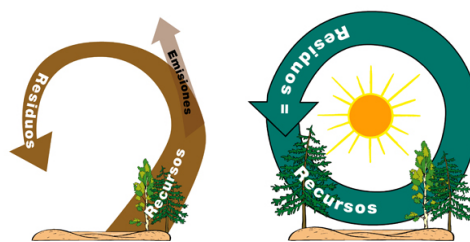


Figura 1.1. Procesos lineales abiertos versus procesos cíclicos cerrados

Pero conseguir esta transformación en este sector no es tarea fácil, debido en gran parte a algunas características inherentes al mismo como son:

- Estar constituido por un elevado número de subsectores e industrias, así como empresas proveedoras de productos y servicios muy dispares, con una mínima información ambiental en muchos casos, y falta de homogeneidad en la misma.
- Englobar procesos de construcción que pueden tomar años en su ejecución y una mínima industrialización de los mismos, con presencia elevada de mano de obra con bajo nivel de cualificación.
- Presentar un escaso rigor en la explotación y gestión de las obras, así como en la consideración de su deconstrucción y fin de vida. Según la Plataforma Tecnológica Española de la Construcción, el 15% de los costes de la construcción se emplean en corregir errores de obra.
- Tener una reglamentación que no favorece la consideración de la minimización del impacto ambiental como valor añadido y factor de competitividad directo entre las empresas.

En lo que respecta a España y su entorno inmediato, en estos momentos, en los que la situación económica está deteriorada con un impacto creciente sobre la sociedad, existe una oportunidad para introducir las consideraciones energéticas y medioambientales en el sector de la construcción y, especialmente, en la edificación.

Según Eurostat, a lo largo de 2009, la producción del sector de la construcción ha registrado descensos en términos interanuales en torno al 18% en la zona euro y en torno al 10% en el conjunto de la Unión Europea (UE), siendo España uno de los países en el que se detectan mayores retrocesos.

La vertiginosa caída de actividad económica y las enormes dificultades tradicionales para incorporar innovaciones tecnológicas en la edificación generan un escenario en el que, a priori, parece que no resulta sencillo generar valor añadido y competitividad a partir de una adecuada gestión de los recursos naturales en toda la cadena de valor de un producto, como son los edificios. A esta situación se suma el hecho de que, desde hace poco más de tres años, con la incorporación de la nueva normativa sobre la eficiencia energética de los edificios, el sector ha debido hacer frente a serios retos. En no pocos casos, las empresas han tenido que invertir en actividades de I+D+i, principalmente en desarrollo e innovación, para competir en el mercado y superar las exigencias reglamentarias.



Dichas reglamentaciones son producto de la trasposición al derecho interno español de numerosas Directivas Comunitarias que afectan a la eficiencia energética y al impacto ambiental de productos y edificios. De hecho, en algunos de los Estados Miembros de la UE, la declaración de los impactos ambientales de productos de la construcción comienza a ser una exigencia por parte de la Administración y de las condiciones contractuales que se dan también entre entidades privadas a fin de contribuir a minimizar costes energéticos y disminuir las emisiones de dióxido de carbono.

De forma estratégica, y con el fin de cumplir con los compromisos internacionales se han desarrollado diversos planes sectoriales y horizontales a nivel nacional, entre los que cabe destacar:

- Plan de Acción 2008-2012 sobre la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España E4.
- Plan Estratégico de Infraestructuras y Transportes 2020 (PEIT).
- Plan de Energías Renovables 2005-2010 y 2011-2020 (en fase de elaboración).
- Plan Nacional de Asignación (PNA) de Derechos de Emisión 2008-2012 y Ley de Comercio de Derechos de Emisión.
- Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia - Horizonte 2007-2012-2020.

Estos planes establecen objetivos concretos y medidas urgentes como evitar la emisión de 32,5 Mt de CO<sub>2</sub> a través del Plan de Acción 2008-2012 de la E4, 27,3 Mt de emisiones de CO<sub>2</sub> en 2010 a través del Plan de Energías Renovables 2005-2010, 30 Mt de emisiones de CO<sub>2</sub> para el 2020 a través del PEIT, etc. No obstante, no resulta suficiente, puesto que el PNA de Derechos de Emisión 2008-2012 presenta como objetivo básico que las emisiones totales de Gases de Efecto Invernadero (GEI) durante 2008-2012 no aumenten en más del 37% las correspondientes al año base (1990) multiplicadas por cinco, esto es, conlleva tomar medidas adicionales a las ya previstas con reducciones anuales de 27,1 Mt de CO<sub>2</sub> equivalentes. En otras palabras, el Plan exige niveles de reducción superior al efecto de las estrategias consideradas en todos los planes.

A pesar de ello, el sector de la construcción no es capaz de asimilar dichas exigencias y transformarlas en herramientas de competitividad por varios motivos.

Por una parte, el carácter cualitativo de las guías de sostenibilidad existentes -como *LEED* o *GbTool*- empleadas para evaluar los impactos ambientales y aportar valor a las obras, no ha favorecido su implantación como un servicio de valor añadido en el mercado ni resultados útiles para contribuir a los compromisos de España ni de los sectores industriales y de la construcción.

Por otra parte, no existe relación y continuidad reglamentaria en materia energética y medioambiental, como así lo demuestra la falta de conexión entre la Directiva de Eficiencia Energética en Edificios (Directiva 2002/91/CE) y la serie de normas ISO 14040 sobre ecodiseño y análisis de ciclo de vida. De este modo, no existe ninguna relación entre la certificación energética de un edificio exigida por la Directiva y su huella ecológica, o el impacto energético y medioambiental de sus materiales y

sistemas constructivos, tal como se ha puesto de manifiesto en diversas publicaciones científicas ,(García Casals X., 2006; Zold A., Szalay Z., 2007).

Además, las metodologías existentes de evaluación del impacto de los edificios son independientes y complicadas de relacionar, de modo que es posible resolver y dar una respuesta aislada a determinadas problemáticas, pero no existe una visión integral y objetiva, y su traducción en términos económicos resulta compleja.

- Los mecanismos de flexibilidad para el cumplimiento de los compromisos de Kyoto como los Proyectos de Aplicación Conjunta (AC), los Mecanismos para un Desarrollo Limpio (MDL), y el Comercio de Derechos de Emisión no se relacionan directamente con las políticas de eficiencia energética en la edificación, ni con el ciclo de vida de los edificios debido a las dificultades para relacionar los mismos y la inexistencia de herramientas integradoras.
- Existe una carencia de conocimiento y herramientas que integren los aspectos antes citados, bases de datos reales adaptadas a la realidad y generadas por consenso, así como una evidente falta de profesionales capacitados y experiencia acumulada.
- Hay una evidente falta de visión de mercado en el que el coste energético y medioambiental se traduzca directamente en una oportunidad de competitividad con una valoración económica directa y faltan mecanismos para incentivarlo y hacerlo efectivo.

En la actualidad existen diversas metodologías que permiten valorar distintos aspectos de la eficiencia energética edificatoria. En este sentido, cabe citar:

- La evaluación de impacto ambiental, regulada por el Real Decreto Legislativo 1/2008, complementaria al enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), al incluir la evaluación de los impactos del emplazamiento de un edificio o conjunto de edificios en su entorno.
- Las Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) o ecoetiquetas tipo III, que permiten la obtención, divulgación y difusión de información ambiental cuantificada sobre el ciclo de vida de un producto.
- La Huella de Carbono (*Carbon Footprint*) que consiste en la cuantificación y comunicación de las emisiones de GEI asociadas directa o indirectamente a un producto, a lo largo de su ciclo de vida a partir de los dos estándares internacionales más reconocidos actualmente: “*Publicly Available Specification (PAS) 2050*”, desarrollado por el *BSI Group*, y “*Green House Gas Protocol*”, desarrollado por el *World Business Council for Sustainable Development* y el *World Resources Institute*, a los que se unirá en un futuro el estándar ISO 14067, actualmente en fase de elaboración.
- La Huella Ecológica (*Ecological Footprint*) definida como “*el área de territorio ecológicamente productivo (cultivos, pastos, bosques o ecosistema acuático) necesaria para producir los recursos utilizados y para asimilar los residuos producidos por una población definida con un nivel de vida específico indefinidamente, donde sea que se encuentre esta área*” (Rees W., Wackernagel M., 1996).

- La Certificación Energética de Edificios, derivada de la Directiva 2002/91/CE, transpuesta por el Real Decreto 47/2007, que pretende fomentar la eficiencia energética de los nuevos edificios en su fase de uso. Conviene destacar que la certificación es hoy una realidad, gracias a los trabajos previos de modelado, simulación y optimización energética de edificios (Álvarez S., 1986; Molina J.L., 1987; Hernández M.A., et al., 2000; Turégano J.A., Hernández M.A., 2001) desarrollados a lo largo de los últimos 25 años.
- La Evaluación y Optimización Energética de las Urbanizaciones donde cabe destacar el trabajo de investigación realizado por el Grupo de Energía y Edificación de la Universidad de Zaragoza (Turégano J.A., Hernández M.A., García F., 2001, 2002a-b; Hernández M.A., 2008),
- Las Auditorías Energéticas, según la Directiva 2006/32/CE sobre la eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos y la norma UNE-EN 216501:2009, que constituyen procedimientos sistemáticos para obtener conocimientos adecuados del perfil de consumo de energía existente de un edificio o grupo de edificios, de una instalación industrial y/o de un servicio privado o público, así como determinar y cuantificar las posibilidades de mejora.
- Las metodologías específicas relacionadas con la evaluación de edificios como, por ejemplo, *BREEAM* (BRE, Reino Unido), *LEED* (US Green Building Council), *GBTTool* (Green Building Challenge), *HQE* (Association HQE, Francia) o *Green Globes* (Green Building Initiative).
- Los estándares relativos a la evaluación de la sostenibilidad de los edificios: prEN 15643-117, prEN 15643-218, prEN 15643-319 y prEN 15643-420, que están siendo desarrollados en la actualidad por el Comité Europeo de Normalización CEN/TC 350.

Sin embargo, todas las metodologías y herramientas anteriores no adoptan un enfoque integrado al considerar únicamente algunos aspectos o etapas del ciclo de vida de los edificios, y en ocasiones, no son consistentes entre sí, al estar basadas en métodos de cálculo distintos, aplicar distintos límites del sistema, o manejar distintos niveles de calidad de datos en cuanto a su representatividad tecnológica, geográfica o temporal.

Por todo ello, se hace necesario el desarrollo y aplicación de una metodología global de carácter horizontal e integrador que permita evaluar, en primer lugar, analizar en detalle posteriormente, y diseñar finalmente edificios con menor impacto, considerando toda la cadena de valor en el proceso de construcción, incluyendo fabricantes de materiales, productos, e instalaciones, constructoras, promotoras, profesionales de la arquitectura y de la ingeniería y usuarios finales, haciendo avanzar al sector de la edificación hacia la ecoeficiencia (Schmidheiny S., 1992), definida como la capacidad de “*ofertar productos y servicios a un precio competitivo, que satisfagan necesidades humanas, incrementando su calidad de vida, reduciendo progresivamente el impacto medioambiental y la intensidad del uso de recursos a lo largo de su ciclo de vida, al menos hasta el nivel de capacidad de carga del planeta*”; y hacia la ecoinnovación (Fussler C., James P., 1996), definida como un procedimiento para obtener “*nuevos productos y procesos que aportan valor para clientes y negocios, pero disminuyendo significativamente sus impactos ambientales*”.

## 1.1. Situación actual del sector de la edificación en España

La construcción es uno de los sectores económicos más importantes de España. En el periodo 2000-2009, ha pasado de representar el 7,4% del Producto Interior Bruto (PIB) a precios de mercado en el año 2000 hasta alcanzar el 10,8% a mediados de 2006, quedando en torno al 10% a finales de 2009.

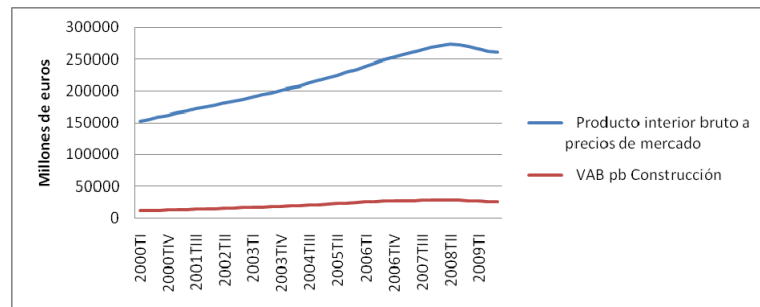


Figura 1.2. Evolución del PIB a precios de mercado y del Valor Añadido Bruto a precios básicos del sector de la construcción en España en el periodo 2000-2009. Fuente: Elaboración propia a partir de estadísticas del INE

El Valor Añadido Bruto (VAB) a precios básicos del sector de la construcción ha experimentado en el conjunto del periodo 2000-2009 un crecimiento del 131%. Si bien desde el cuarto trimestre de 2007 hasta el tercer trimestre de 2009 ha sufrido un descenso del 8,4%, la repercusión del VAB del sector en el PIB español es aproximadamente el doble que la media de la UE-27, tal como muestra la Figura 1.3.

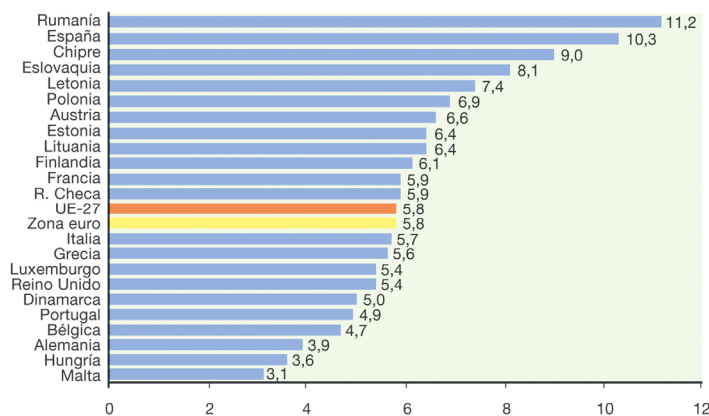


Figura 1.3. VAB de la construcción como porcentaje del PIB en distintos países europeos durante el primer trimestre de 2009. Fuente: (Guaita N., et al., 2009, a partir de estadísticas de Eurostat, 2009)

La mayor parte del volumen de negocio del sector de la construcción se concentra en la edificación residencial (50%), seguida por la obra civil (30%) y la edificación no residencial (20%). Asimismo hay que destacar el bajo peso de las obras de restauración y conservación (19%) frente a la obra nueva (81%).

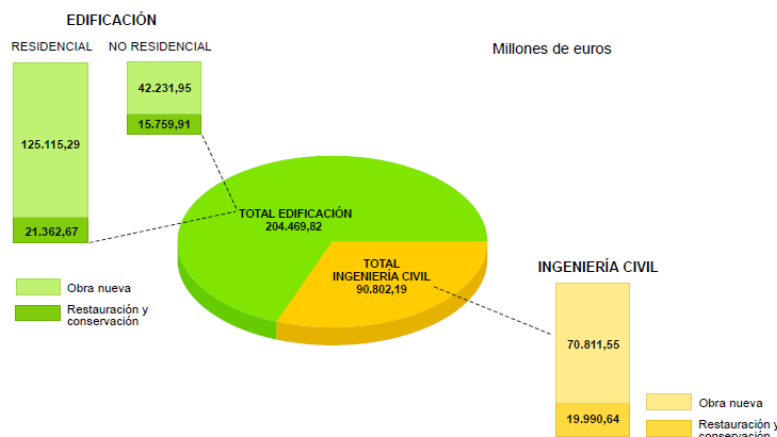


Figura 1.4. Volumen de negocio en el sector de la construcción según el tipo de obra en 2007. Fuente: (Ministerio de Fomento, 2008).

El coste laboral medio en el sector de la construcción es de 33.558 €/año, mientras que el coste laboral asociado a la parte constructiva de la rehabilitación, incluyendo el coste salarial bruto y los costes sociales asumidos por la empresa, representa el 70% de la cantidad anterior (Hernández P., Jiménez D., Nieto J., 2008). Esto conlleva que el ratio de empleo obtenido por capital invertido es mayor para la rehabilitación que para nuevas construcciones.

Centrándonos en la edificación, la Figura 1.5 muestra el fuerte predominio de los edificios residenciales de nueva planta frente al número de edificios rehabilitados o demolidos en el periodo 1999-2008, lo que se traduce en un importante aumento de la ocupación del suelo.

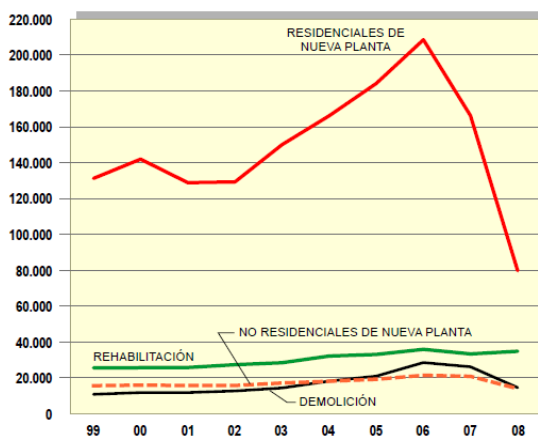


Figura 1.5. Evolución de las licencias de obra para edificios según tipo de obra en el periodo 1999-2008. Fuente: (Ministerio de Fomento, 2008).

En términos de empleo, en el periodo 2000-2009, la construcción ha experimentado dos etapas bien diferenciadas. Desde 2000 hasta mediados de 2007, el empleo en este sector experimentó un crecimiento global del 51%. Sin embargo, desde ese momento hasta el tercer trimestre de 2009 ha sufrido una caída del 34%. En ese momento, la construcción representaba el 9% del empleo total nacional.

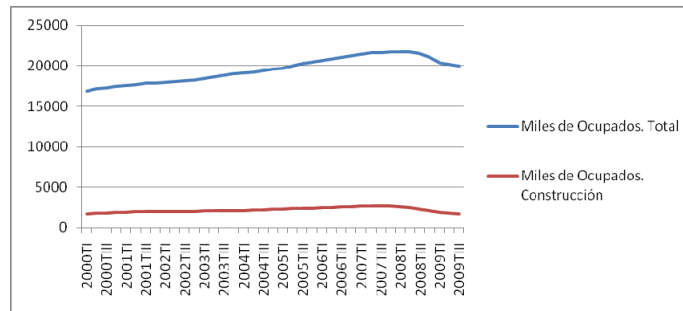


Figura 1.6. Evolución del número de puestos de trabajo totales y en el sector de la construcción en España en el periodo 2000-2009. Fuente: Elaboración propia a partir de estadísticas del INE

Si se compara la evolución de la población y del número de viviendas en España desde 1950 hasta la actualidad se observa una tendencia al alza del número de viviendas por habitante, o lo que es lo mismo, una tendencia a la baja del número de habitantes por vivienda. Estas tendencias son especialmente notables en los periodos 1960-70 y 2000-10. Sin embargo, y paradójicamente, España sigue siendo uno de los países de Europa con mayor dificultad de acceso a la vivienda.

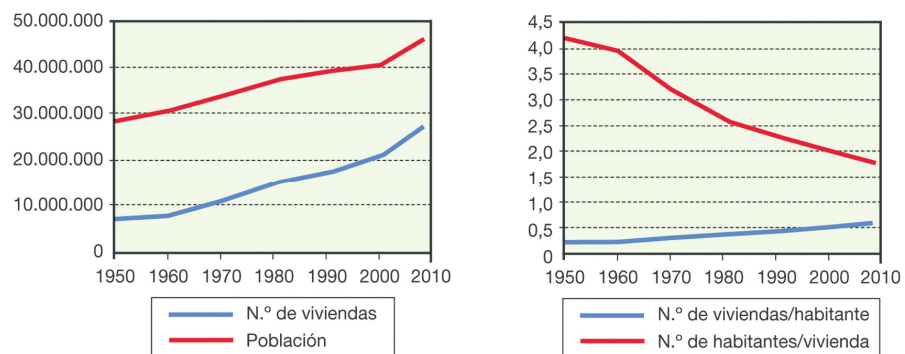


Figura 1.7. Evolución del número de viviendas y de la población en España en el periodo 1950-2009. Fuente: Elaboración propia a partir de estadísticas del INE y del Banco de España, 2009

El último Censo de Población y Viviendas de España fue realizado por el INE en 2001. Al realizarse con carácter decenal, el próximo Censo no se publicará hasta 2011. Analizando los datos del Censo de 2001 surgen diversas reflexiones que se apuntan a continuación.

En el periodo comprendido entre 1991 y 2001, el número de hogares españoles aumentó un 20% frente a sólo un 5% de crecimiento poblacional. En ese mismo periodo, diversos cambios sociales (mayor número de personas solteras y mayores de 65 años que viven solos, así como el incremento de rupturas matrimoniales) propiciaron que el número de hogares habitados por una sola persona se multiplicase por dos. Asimismo en 2001 casi el 70% de los hogares disponían al menos de 1 vehículo (sin considerar las motocicletas), el 27% de los edificios destinados a viviendas disponían de garaje y el número medio de vehículos era aproximadamente de 1 por hogar, superando en numerosas provincias dichos valores promedios.

Según esta misma fuente, en España durante el periodo 1991-2000, el tamaño usual de las nuevas viviendas unifamiliares construidas fue de 76-90 m<sup>2</sup> (sin incluir terrazas abiertas o jardines ni sótanos, desvanes o trasteros que no sean habitables), el número habitual de plantas en los bloques de viviendas fue de 4, y el valor medio de ocupación fue de 1 ocupante por cada 30 m<sup>2</sup> de vivienda. En cuanto al número de habitaciones -incluyendo los dormitorios, cocina, salón y todas las estancias con más de 4 m<sup>2</sup>- la mayor parte de los hogares (38%) tenían 5 habitaciones.

Las siguientes figuras muestran la distribución de viviendas unifamiliares de nueva planta en función de su superficie y la distribución de bloques de viviendas de nueva planta en función de su número de plantas en el periodo 1991-2000 (INE, 2004).

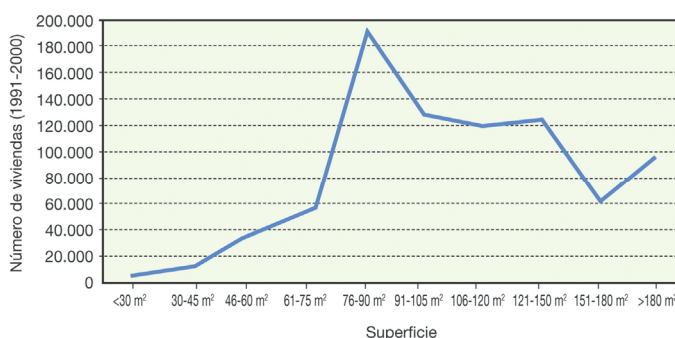


Figura 1.8. Distribución de viviendas unifamiliares de nueva planta en función de la superficie útil. Fuente: (INE, 2004)

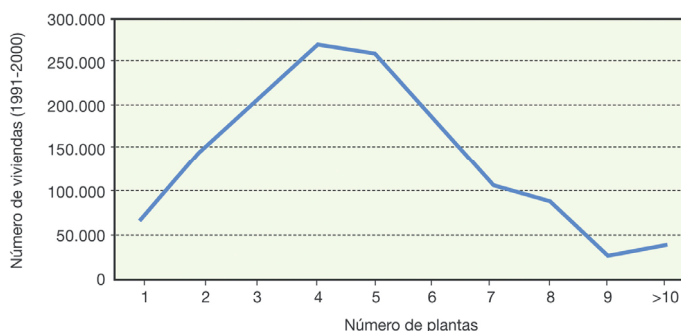


Figura 1.9. Distribución de bloques de viviendas de nueva planta en función del número de plantas del edificio. Fuente: (INE, 2004)

Comparando los valores en 1991 y 2001, se observa una tendencia al aumento en la superficie útil de la vivienda, lo que habitualmente se traduce en unos mayores consumos energéticos, especialmente para cubrir la demanda de climatización.

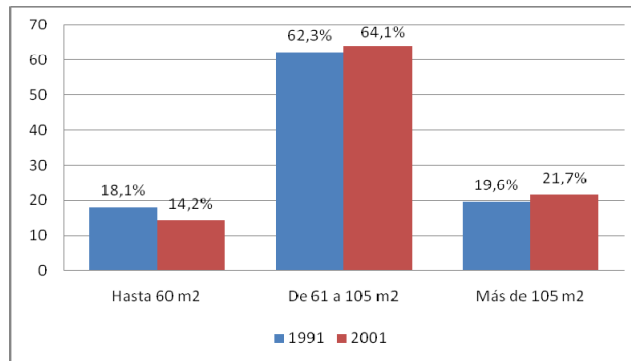


Figura 1.10. Evolución de la superficie útil de las viviendas principales en el periodo 1991-2001. Fuente: Elaboración propia a partir de estadísticas del INE

Según el IDAE, en el periodo 1990-2005, el crecimiento de la superficie construida en edificios en España ha sido del 143%, lo que supone una tasa media anual del 9,5%, con un crecimiento en el consumo de energía final del 4,8%.

A pesar del fuerte crecimiento que ha experimentado el parque de viviendas en el último decenio, el parque global de viviendas español es antiguo, debido al auge que tuvo la construcción de bloques de viviendas, especialmente en la etapa de desarrollismo que se produjo durante la década de los 60 y 70, unido a la ausencia de planes y políticas de rehabilitación. Alrededor de 12 millones de pisos tienen más de 30 años de antigüedad y cerca de 6 millones tienen más de medio siglo. Pero son los pisos construidos en el boom edificatorio de los años 60 los que presentan una peor calidad en su envolvente térmica, ya que la “democratización” que se produjo en el acceso a la vivienda vino acompañada de una baja calidad constructiva (llegando a utilizarse en varios casos cemento aluminoso), en contraste con las viviendas construidas anteriormente, menos accesibles a la población, pero de mayor calidad constructiva.

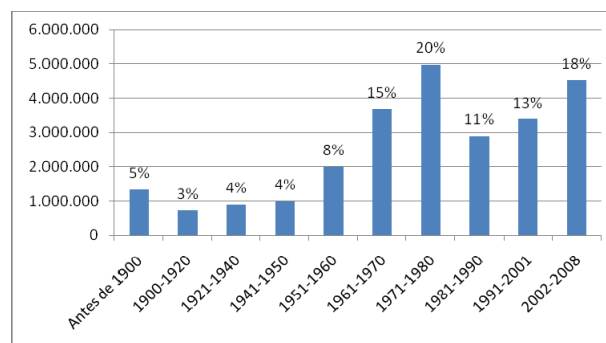


Figura 1.11. Distribución de viviendas por año de construcción. Fuente: Elaboración propia de partir de estadísticas del INE

Por otra parte, en 2001 había en España 3,1 millones de viviendas vacías, lo que suponía un 14,8% del total de viviendas y un aumento del 25,5% respecto al Censo de 1991. Este hecho conlleva consecuencias negativas evidentes desde el punto de vista económico, debido a la existencia de un patrimonio sin aprovechamiento; pero sobre todo desde el punto de vista social, produciéndose un uso inadecuado de la propiedad, contrario al principio de su función social. Además, teniendo en cuenta que el territorio es un bien básico y limitado, un desarrollo residencial por encima de las necesidades de alojamiento conlleva un uso insostenible de los recursos, además de un deterioro del paisaje (Vinuesa J., 2008).



El stock, paraliza sin duda la construcción de nuevas viviendas, debido a la sobreoferta existente, pero puede ayudar a que las oportunidades de negocio del sector se centren en la rehabilitación. Este giro en la actividad del sector contribuiría a mejorar la eficiencia energética de las viviendas, teniendo en cuenta que buena parte de las viviendas no disponen de aislamiento térmico. Hay que considerar que hasta el año 1979 no se promulgó la primera normativa nacional que obligaba a aislar los edificios (Norma básica de la Edificación sobre Condiciones Térmicas en los Edificios NBE-CT79), por lo que los edificios de viviendas construidos hasta esa fecha, que representan casi el 58% del parque actual de viviendas, o no disponen de aislamiento o bien su estado actual es deficiente, siempre que no hayan sido rehabilitados. Además, desde 1979 hasta la aprobación en 2006 del Código Técnico de la Edificación (CTE), en muchos casos no se ha verificado con el rigor adecuado el cumplimiento de la normativa, lo que conlleva que muchos edificios construidos en dicho periodo presenten en la actualidad un aislamiento insuficiente.

Además, la rehabilitación de un edificio supone generalmente un ahorro energético del 60% respecto a su derribo para volver a construirlo. Asimismo, puesto que en una rehabilitación se suele mantener toda la estructura y al menos el 50% de la albañilería, se puede llegar a ahorrar (respecto a una obra nueva) el 42% del presupuesto correspondiente a la estructura y la mitad del 24% asociado a la albañilería (De Luxán M., et al., 2009).

	1991	2001	
Viviendas principales	11.750.412	14.187.169	
Viviendas no principales	5.469.987	6.759.385	
- Secundarias	2.923.615	3.360.631	
- Vacías	2.475.639	3.106.422	
- Otras (alquileres de corta duración)	70.733	292.332	
Total VIVIENDAS	17.220.399	20.946.554	

Tabla 1.1. Evolución del parque de viviendas en el periodo 1991-2001 y distribución del tipo de viviendas en 2001. Fuente: (INE, 2004)

Por otra parte, entre 1991 y 2001 se observa un aumento del 15% en las viviendas secundarias, usadas sólo durante los fines de semana y los periodos vacacionales, lo que conlleva un aumento de la movilidad de la población, ya que casi en el 50% de los casos la segunda vivienda se sitúa en una provincia distinta de la vivienda principal; así como mayores gastos en climatización, ocasionados por la inercia térmica a vencer –dependiendo de la ubicación y del diseño de la vivienda– derivada del uso puntual y no continuado de la segunda vivienda. En numerosos municipios turísticos situados en la costa, como Roses, Punta Umbría, Benicàssim, San Javier, etc., las viviendas secundarias representaban en 2001 más del 70% del total de viviendas. En este sentido, el arquitecto urbanista Fernando Prats alertó ese mismo año sobre la necesidad de un cambio del modelo turístico español (Prats F., 2001) que produce una fuerte degradación del litoral, especialmente en su vertiente mediterránea. En 2001, un total de 2,1 millones de hogares españoles disponían al menos de una segunda vivienda, destacando muy por encima de la media la Comunidad de Madrid, donde más del 22% de los hogares poseían una segunda vivienda. Hay que destacar también que en los municipios (como Zaragoza), que concentran fuertemente la actividad económica de una región, existen viviendas secundarias que sólo son utilizadas durante los días laborables, situándose la vivienda principal en otros municipios de la región.

A pesar de que en el conjunto del periodo 2001-2008 el porcentaje de viviendas no principales –que engloba principalmente a las viviendas secundarias y vacías– solo ha aumentado en un 1,1% (Guaita N., et al., 2009), esta tendencia, que se empezó a producir en la década de los 60, y que desde entonces se ha mantenido de forma continuada, conlleva ir hacia un modelo de parque edificatorio sobredimensionado e infrautilizado.

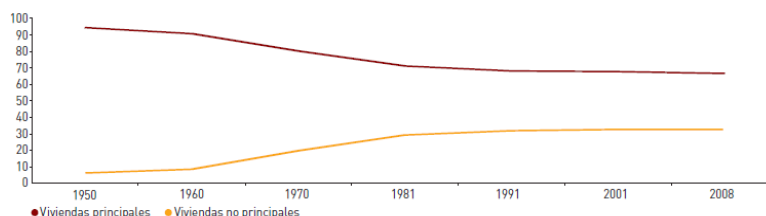


Figura 1.12. Porcentaje de viviendas familiares principales y no principales. Fuente: (Guaita N., et al., 2009 a partir de estadísticas del INE, Ministerio de Vivienda, Ministerio de Fomento, y Equipo Español del GBC)

En cuanto a las instalaciones, por término medio el 48% de las viviendas disponía en 2001 de un sistema activo de calefacción frente a un 16% que disponía de un sistema de refrigeración. Los sistemas colectivos de calefacción predominaban con respecto a los individuales, aunque éstos últimos vienen presentando una tendencia creciente. El principal combustible utilizado para calentar las viviendas era el gas, seguido de la electricidad, el gasóleo, y en menor medida, la biomasa y el carbón. Además, el 52% de los edificios destinados a viviendas poseían un sistema de ACS centralizado, y la práctica totalidad (98-99%) disponían de agua corriente y evacuación de aguas residuales.

A pesar de la trascendencia de todos los indicadores mencionados anteriormente, en la actualidad, no existe una estadística oficial en la que se cuantifiquen todos ellos conjuntamente con un criterio común y homogéneo, por lo que hay que remitirse en la mayor parte de los casos a las estadísticas del Censo que, como ya se ha comentado, se actualizan cada diez años. No obstante, es posible encontrar valores actualizados para algunos indicadores a través de diversas estadísticas elaboradas por los Ministerios de Vivienda y Fomento.

En este último decenio, la confluencia de diversos factores demográficos, económicos, sociales, normativos y especulativos ha propiciado la creación de una fuerte burbuja inmobiliaria en España. Entre estos factores cabe destacar: el crecimiento demográfico motivado en parte por el aumento de la inmigración, la acusada tendencia en la sociedad española hacia la propiedad inmobiliaria, ayudada por una fiscalidad ventajosa y una reglamentación deficiente del mercado del alquiler (que en 2008 solo representaba el 10,85% de las viviendas españolas totales, cuando en países como Alemania supera el 50%), los problemas de financiación de los Ayuntamientos y sus competencias urbanísticas, que han provocado que éstos se hayan financiado en buena parte del mercado de la construcción, los bajos tipos de interés y la facilidad para la obtención de crédito, etc.

Como muestra la Figura 1.13, en los últimos años se evidencia una clara relación entre el descenso en los tipos de interés y el auge inmobiliario, visible a través del elevado número de viviendas iniciadas.

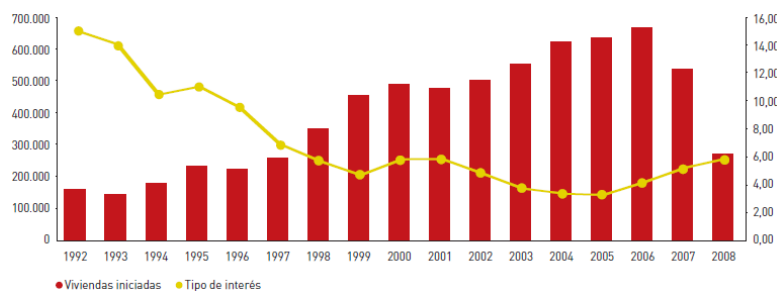


Figura 1.13. Tipos de interés y número de viviendas iniciadas. Fuente: (Guaita N., et al., 2009 a partir de estadísticas del Ministerio de Vivienda y del Banco de España)

Uno de los principales síntomas de la burbuja ha sido el fuerte incremento en el precio medio de la vivienda registrado entre los años 1998 y 2007. A partir de dicho año, el pinchazo en la burbuja inmobiliaria ha ocasionado un ligero descenso, que se espera que se mantenga también en 2010 en un nivel del 5% aproximadamente.

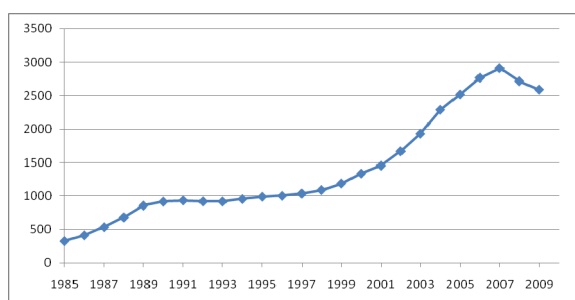


Figura 1.14. Evolución del precio medio de la vivienda en España en el periodo 1985-2009. Fuente: (Sociedad de Tasación, 2009)

El fuerte desarrollo inmobiliario de estos últimos años está además modificando el tradicional modelo urbanístico español caracterizado por su compacidad, produciendo una fragmentación y dispersión de las ciudades, característica del modelo anglosajón y americano, priorizando un crecimiento urbano expansivo frente a la reorganización de las áreas urbanas consolidadas. El modelo disperso está basado en un desarrollo segregado de sectores urbanos de actividad monofuncional: zonas residenciales, parques empresariales o industriales, grandes centros de comercio y ocio, etc., que únicamente se conectan entre sí y con la ciudad consolidada mediante infraestructuras viarias, lo que produce un fuerte incremento de las necesidades de movilidad.

Desde una perspectiva energética y medioambiental, este cambio de modelo conlleva un mayor impacto, aumentando la ocupación del suelo y, por tanto, su artificialización y creando nuevas necesidades de movilidad e infraestructuras de transporte, energía y agua, que contrarrestan e incluso llegan a anular las posibles mejoras incorporadas en el diseño de los edificios. Además, desde el punto de vista social, este cambio de modelo conlleva una mayor individualización, disminuyendo la cohesión social y la comunicación entre los individuos.

El alto impacto de la movilidad en España ha sido analizado por autores como Antonio Estevan, especialista en la planificación territorial de los recursos hídricos, la energía y el transporte, que compara con acierto el efecto del vehículo en las ciudades con una “bomba” cuya onda expansiva tiende a trasladar los edificios y

actividades hacia la periferia, dificultando la convivencia en el centro de las ciudades; proponiendo una nueva “economía ecológica del transporte” a través de una mejora de la accesibilidad ligada más a una proximidad que minimice las necesidades de desplazamiento, que a la facilidad de desplazamiento a un determinado lugar por medio de la continua expansión del sistema de transporte (Estevan A., Sanz A., 1996; Estevan A., 2005).

La Figura 1.15 demuestra el mayor consumo de combustible per cápita derivado del modelo urbanístico disperso frente al modelo más compacto característico de Europa y Japón. En cualquier caso, se estima que los asentamientos urbanos absorben tres cuartas partes de los recursos mundiales.

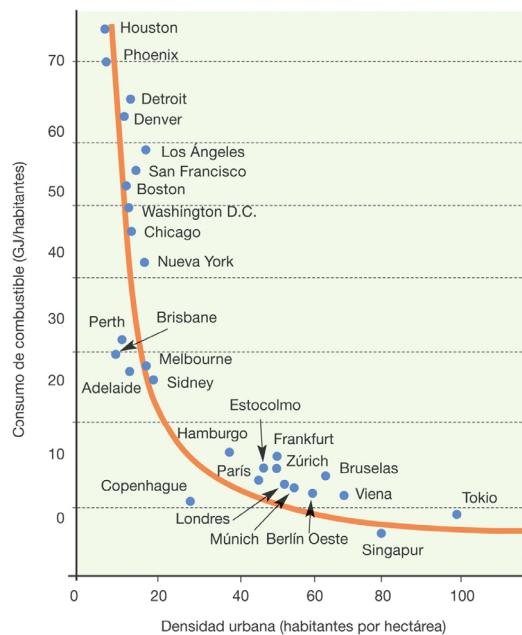


Figura 1.15. Reducción per cápita del consumo de combustible en función del incremento de la densidad urbana en diversas ciudades del mundo. Fuente: (Ozcáriz J., Prats F., 2009)

Conviene recordar que los efectos negativos del crecimiento urbano sobre el territorio ocupado fueron ya descritos por el biólogo, geólogo y urbanista escocés, Patrick Geddes, quien a principios del siglo XX acuñó ya el término de conurbación (Geddes P., 1915).

En España, la superficie ocupada por las viviendas a construir en el periodo 2000-2008 (según licencias) fue del 0,18% del territorio nacional, existiendo una mayor ocupación del suelo en las regiones litorales y más urbanas, siendo la Comunidad de Madrid, la que más creció con una ocupación del 1,20% respecto a la superficie de dicha Comunidad (Ministerio de Fomento, 2008).

El informe “Sostenibilidad Local, una aproximación urbana y rural” del Observatorio de la Sostenibilidad en España (Ayuso A.M., et al., 2008) señala que la mayoría de las grandes ciudades españolas supera la biocapacidad disponible en sus territorios circundantes, lo que significa que sus ciudadanos consumen más recursos y generan más residuos de los que su provincia es capaz de asumir. La mayor huella ecológica la presentan Bilbao, que necesita 100 veces su territorio

municipal para satisfacer sus necesidades, y Barcelona, que requiere 83 veces más que su propio término municipal. En el extremo contrario se sitúan Teruel y Badajoz, con una huella ecológica de 5 y 2,2 respectivamente. Por ello, se hace necesario equilibrar dichas tensiones territoriales, potenciando un desarrollo armónico y sostenible de todos los territorios. Asimismo hay que destacar que mientras la huella media mundial es de 1,8, en el caso de España, la huella es de 2,6, lo que quiere decir que necesitaríamos casi tres países como España para estar en equilibrio.

Una de las características del proceso de urbanización en España es la escasez de zonas verdes urbanas. Según el informe anteriormente mencionado, solamente 15 capitales de provincia presentan una ratio de superficie verde urbana por habitante superior al límite inferior propuesto por la Organización Mundial de la Salud, que es de 10 m<sup>2</sup> de zona verde por habitante, destacando únicamente Vitoria-Gasteiz con una ratio de 40 m<sup>2</sup>/habitante.

Autores como el sociólogo Mario Gaviria, experto en planeamiento urbanístico y sociología rural y urbana, ha subrayado la problemática del uso del suelo, como bien escaso e insustituible, productor de alimentos y oxígeno, y captador de agua, señalando los conflictos existentes por la competencia entre los usos urbanos, industriales y turísticos del suelo frente al uso rural del suelo. Dichos conflictos se ponen de manifiesto en la mayor parte de ciudades españolas, que han ido creciendo a base de “ocupar” suelos tradicionalmente agrícolas (Gaviria M., 1978).

Frente al actual modelo, el sociólogo y urbanista estadounidense Lewis Mumford - quien realizó un completo análisis de las relaciones entre la ciudad, la tecnología y el territorio- propuso un modelo de “ciudades jardín” integradas en el medio rural como una solución frente a las grandes congestiones metropolitanas. En este modelo se integrarían a una escala sostenible las componentes y funcionalidades residencial, cultural, comercial e industrial de la ciudad, que además estaría rodeada por un cinturón verde para uso agrícola que suministraría alimentos a la población y delimitaría su frontera con las comunidades vecinas (Mumford L., 1956).

Dentro de esta línea de trabajo de urbanismo y medioambiente, cabe destacar al economista José Manuel Naredo, quien ha desarrollado diversos estudios sobre la creciente expansión urbana, la interacción de los flujos de agua, de energía y materiales en las áreas urbanas y la ocupación de suelos de calidad agronómica (Naredo J.M., Frías J., 1988), siendo uno de los autores de referencia en temas de economía ecológica (Naredo J.M., 2006). En 1996, ya alertó sobre el peso cada vez mayor del negocio inmobiliario en la economía española (Naredo J.M., 1996), que debería haber servido para apostar desde ese mismo momento por otro modelo de desarrollo económico y evitar la creación de burbujas inmobiliario-financieras.

Asimismo hay que reconocer al biólogo y psicólogo Salvador Rueda, especialista en el análisis del medio ambiente y la ecología urbana, quien defiende un modelo de ciudad compacto y sostenible con un mínimo consumo de recursos energéticos y materiales y un máximo grado de complejidad organizativa urbana caracterizado por la mezcla de distintos usos y funciones urbanas (Naredo J.M., Rueda S., 1997; Rueda S., 2000, 2001, 2002).

Dentro de esta línea hay que destacar también los trabajos del arquitecto Mariano Vázquez, en la determinación del tamaño adecuado de la ciudad que garantice su complejidad y diversidad (Vázquez M., 1999), la aplicación de criterios de

sostenibilidad sobre las actuaciones de rehabilitación de edificios (De Luxán M., et al., 2009), enfatizando la necesidad de considerar la energía incorporada en los materiales de construcción y el buen aprovechamiento de la energía solar en los edificios (Vázquez M., 2000a-b).

La edificación es un sector clave en la lucha contra el cambio climático. Según el Ministerio de Vivienda, la quinta parte de las emisiones de GEI en España es consecuencia del uso de energía en los edificios. Si a este consumo directo de energía, se le suma el que se produce durante la fabricación de los materiales de la construcción, el sector de la edificación es responsable de la tercera parte de las emisiones de GEI en España (Cuchí A., Pagès A., 2007).

En términos energéticos, el sector de la edificación representa aproximadamente el 17% del consumo de energía final nacional, correspondiendo un 10% al sector doméstico y el 7% restante al sector terciario. Las instalaciones de calefacción y agua caliente sanitaria en viviendas y las instalaciones de climatización e iluminación en edificios terciarios son las que más contribuyen a elevar los consumos de este sector (Zabalza I., et al., 2008).

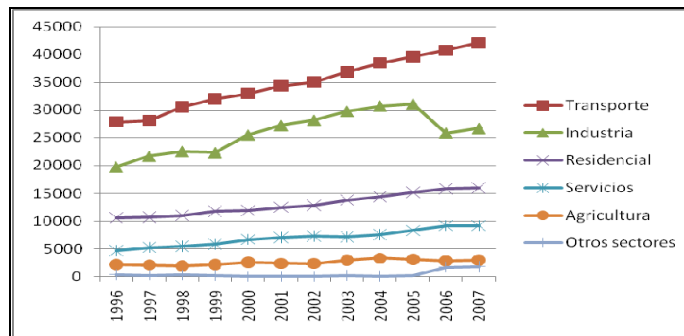


Figura 1.16. Evolución del consumo de energía final (ktep/año) en España durante el periodo 1996-2007 en los distintos sectores de actividad. Fuente: Eurostat.

De la Figura 1.16 se puede deducir que el consumo total de energía final en España se incrementó en el periodo 1996-2007 en casi 33.300 ktep, lo que supone un crecimiento medio anual del 4,3%. En ese mismo periodo, el incremento del consumo directo de la edificación (residencial + servicios) fue de 9.880 ktep, lo que representa casi el 30% del incremento total. Si a dicho consumo directo se le añade el consumo indirecto asociado a la energía incorporada en los materiales de construcción, el incremento, estimado en 14.115 ktep, la edificación supone el 42% del incremento total.

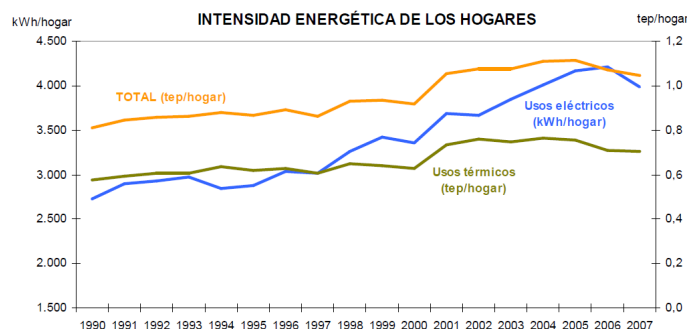


Figura 1.17. Evolución de la intensidad energética de los hogares en España durante el periodo 1990-2007. Fuente: IDAE y MITyC.

Por otra parte, según muestra la Figura 1.17, la intensidad energética en los hogares españoles se incrementó durante el periodo 1990-2007 en un 29% (especialmente para usos eléctricos), lo que supone un crecimiento promedio del 1,7% anual. En 2007, dicha cifra ascendía a 1,05 tep/hogar (siendo la energía primaria per cápita de 3,2 tep/habitante año), cifra inferior a la media de la UE que debido a la mayor severidad climática se sitúa en los 1,7 tep/hogar, si bien a diferencia de la ratio española, en Europa este valor ha permanecido prácticamente estable durante los últimos años.

Según el IDAE, en 2007 el consumo de energía final de una vivienda media en España se distribuye en calefacción (47,3%), agua caliente sanitaria (26,7%), electrodomésticos (14,4%), cocina (6,8%), iluminación (4%) y aire acondicionado (0,8%). Obviamente, estos porcentajes varían dependiendo de la zona climática. Al comparar esta distribución con la vivienda media europea, se observa un aumento del peso de la calefacción hasta el 66,9%, debido a la mayor severidad climática invernal en Europa. En cualquier caso, según estimaciones del IDAE, los consumos anteriores representan el 44% del consumo total de la vivienda, siendo el restante 56% debido al consumo de combustible del vehículo (o vehículos) de la vivienda.

Según esta misma fuente, la distribución del consumo de energía final en un edificio terciario medio difiere notablemente de la anterior, desglosándose del siguiente modo: refrigeración (30%), calefacción (29%), iluminación (28%), ofimática (4%), agua caliente sanitaria (3%) y otros equipos (6%).

Además hay que tener en cuenta que en el momento en que las 3,1 millones de viviendas vacías existentes en España se ocupen y sean utilizadas, considerando las ratios anteriores, el consumo directo de energía final en España se podría llegar a incrementar en 3.255 ktep/año.

El informe *“Cambio Global España 2020/50. Programa Ciudades. Hacia un pacto de las ciudades españolas ante el cambio global”* (Ozcáriz J., Prats F., 2009) apunta claramente hacia la insostenibilidad del modelo actual. Así, el escenario tendencial contemplado, sin tomar medidas adicionales para la mejora de la sostenibilidad edificatoria y suponiendo que no se es capaz de frenar el afán especulador que se ha producido en los últimos años, vislumbra en el horizonte temporal de 2050 un parque edificatorio de más de 47 millones de viviendas (un 96% mayor que el parque actual) para una población de 51 millones de habitantes (un 11% mayor que la población actual) con un consumo energético de 34,7 Mtep.

Los datos y cifras anteriores obligan, por tanto, a reflexionar sobre la necesidad de ir introduciendo en la legislación, de forma progresiva, medidas innovadoras para el ahorro y la mejora de la eficiencia energética de los edificios, desde una perspectiva lo más global y amplia posible.

## **1.2.Líneas de actuación en eficiencia energética en la edificación**

El concepto de “energía neta”, utilizado muy frecuentemente para describir el balance entre la energía requerida para el funcionamiento de un edificio y la energía producida por sus sistemas energéticos renovables, es original del médico ucraniano Sergei Podolinski, que a finales del siglo XIX describió la necesidad de aplicar los principios de la termodinámica a la producción económica (Podolinsky S., 2004). No obstante, los primeros estudios en los que se aplicó este concepto a los edificios datan de finales de los años 70.

Así, (Hannon B., et al., 1978) extraía valores de energía incorporada de un modelo Input-Output de flujos energéticos de la economía de EE.UU. y se comparaban con los consumos de energía típicos de las viviendas.

Los primeros intentos documentados de construir edificios de cero-energía buscaban en realidad conseguir edificios de cero-calefacción, mediante casas solares. La primera de ellas fue la “Casa Solar MIT I” del *Massachusetts Institute of Technology* de EE.UU, construida en 1939, que incluía una gran superficie de captación solar térmica y almacenamiento de agua (Butti K., Perlin J., 1980). Unos años más tarde, se construyó la “Bliss House” (Bliss R.W., 1955), que utilizaba captadores solares de aire y almacenamiento térmico en rocas. Posteriormente, a finales de la década de los 70, se construyó la vivienda de Vagn Korsgaard en Dinamarca (Esbensen T.V., Korsgaard V., 1977) y la vivienda de Saskatchewan (Besant R.W., Dumont R.S., Schoenau G., 1979), con elevados espesores de aislamiento, con objeto de conseguir, en ambos casos, un consumo cero o cuasi cero en calefacción.



*Figura 1.18. Primera Casa Solar MIT I en 1939*

Estos primeros ejemplos han tenido una gran influencia en los actuales diseños, contribuyendo a la definición de estándares edificatorios y la promulgación de las correspondientes normativas y reglamentos. De hecho, estándares de edificios de baja energía, como el “*Passive House*”, que aplican los principios de alto aislamiento, elevada estanqueidad al aire y sistemas de recuperación del calor de ventilación, son cada vez más populares y se están extendiendo cada vez más.

Estos estándares permiten una reducción en la demanda energética de calefacción, que en climatologías donde predomina la severidad climática de invierno, ayudan a acercarse al objetivo de cero energía neta.

No obstante, la idoneidad de estos estándares a día de hoy es cuestionable dependiendo de las cargas internas del edificio y de la climatología en la que se ubica. En este sentido, conviene reseñar que, en la actualidad, las cargas térmicas en los edificios, especialmente en los del sector terciario, son cada vez mayores. A modo de ejemplo, basta recordar que los equipos informáticos, presentes hoy en día en la mayor parte de los edificios, tan apenas se podían encontrar hasta hace 20-25 años.

Además los cada vez mayores consumos indirectos de los edificios son excluidos de toda consideración, lo que obliga a proponer nuevos estándares que permitan conseguir una edificación sostenible.



### 1.2.1. Iniciativas internacionales

En la mayor parte de los países del mundo, los edificios residenciales son responsables de una parte importante del consumo de energía del sector de la edificación, aunque el porcentaje de consumo asociado a los edificios comerciales y oficinas puede ser también destacado, como en el caso de Norteamérica.

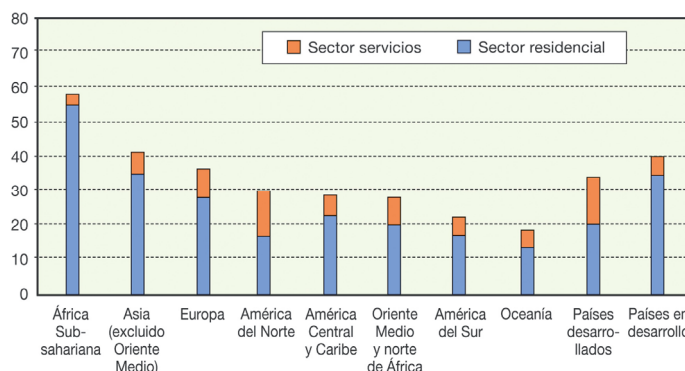


Figura 1.19. Porcentaje de consumo energético del sector de la edificación respecto al consumo energético total en distintas zonas del mundo. (Fuente: Huovila P., et al., 2007)

En la Figura 1.19 destaca el alto porcentaje que representa el consumo de las viviendas en los países del África subsahariana, como consecuencia directa de la práctica inexistencia del sector industrial y del transporte.

En la actualidad existen un buen número de iniciativas en el ámbito internacional relacionadas con la mejora de la eficiencia energética edificatoria. En este sentido, cabe citar el “*Building Technologies Program*” (BTP) del Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE), en el que participan diversos laboratorios nacionales y socios industriales, que financia la investigación y el desarrollo tecnológico para reducir el consumo energético en edificios de uso residencial y comercial.

En Estados Unidos, los edificios consumen más energía que cualquier otro sector de su economía, existiendo un gran potencial de mejora en su eficiencia energética. Según el DOE, en 2006 había en Estados Unidos aproximadamente 113 millones de edificios residenciales, que suponían el 21% del consumo de energía primaria y el 20% de las emisiones de dióxido de carbono, con un gasto energético total de 225,6 billones de dólares. Además casi el 60% de los edificios fueron construidos con anterioridad a 1979. Por otra parte, ese mismo año, los edificios comerciales, totalizaban un área de casi 7 billones de metros cuadrados, representando el 18% del consumo de energía primaria y el 36% del consumo eléctrico. Además, en ese año se invirtieron más de 190 billones de dólares en mejoras y reparaciones en este tipo de edificios.

El BTP promueve el uso de tecnologías más eficientes en la envolvente térmica de los edificios, el equipamiento, la iluminación, el aprovechamiento solar activo y pasivo, la regulación y el control, etc., unidas a un diseño optimizado del edificio considerando las interacciones existentes entre los sistemas energéticos y los elementos de construcción.

Uno de los objetivos del BTP es desarrollar tecnologías y enfoques de diseño que permitan conseguir edificios de energía cero, es decir, edificios que en su balance anual produzcan tanta energía (típicamente mediante instalaciones on-site de energías renovables) como consumen. El horizonte temporal establecido es 2020 para los edificios residenciales y 2025 para los edificios comerciales.

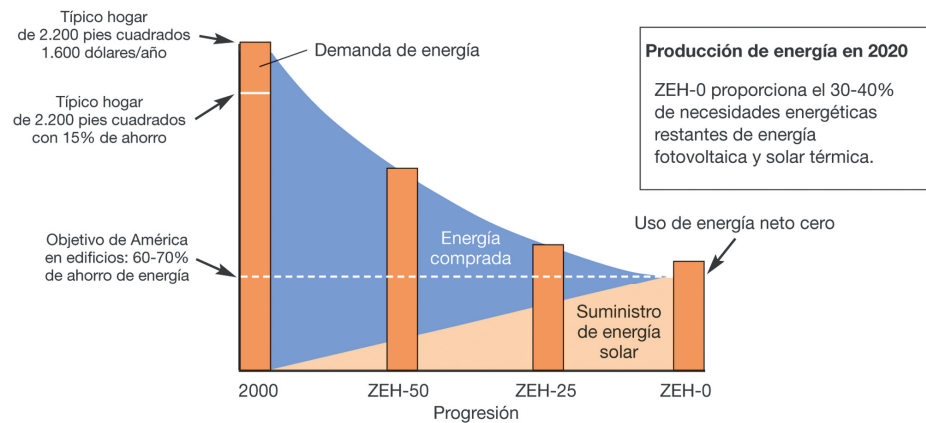


Figura 1.20. Evolución hacia el objetivo de edificios de energía cero. (Fuente: Huovila P., et al., 2007)

En línea con este objetivo, desde la “Task 40” del “Solar Heating & Cooling Programm” de la Agencia Internacional de la Energía y el “Annex 52” del “Energy conservation in Buildings and Community Systems Programme” se está trabajando en la definición de un estándar de edificios de cero, cuasi-cero y bajo consumo de energía. A partir de una recopilación a nivel internacional de edificios que cumplan con dichas especificaciones, se está creando una base de datos de “Net Zero Energy Buildings” (NZEB) y se van a proponer las directrices, soluciones, herramientas e instrumentos necesarios para convertir dichos estándares en una realidad práctica del mercado (Voss K., Riley M., 2009).

Otra iniciativa de gran interés es el “Green/Sustainable Building Challenge” (GBC/SBC), proyecto internacional de cooperación liderado por el *iiSBE* (International Initiative for a Sustainable Built Environment) en el que participan más de 20 países, y del que España es miembro desde el año 2002. Esta iniciativa pretende desarrollar y aplicar una nueva metodología para evaluar el comportamiento ambiental de los edificios a través del método GBC, basado en un conjunto de criterios ponderados de análisis de los datos aportados por un inventario de ciclo de vida de los edificios. La aplicación del método GBC proporciona una medida del comportamiento de las nuevas edificaciones así como de las rehabilitaciones, tanto del sector residencial como del sector servicios, respecto a un grupo de indicadores de sostenibilidad. El método se implementa por medio de la herramienta *GBTool*, desarrollada en un entorno MS Excel, que permite calificar una serie de indicadores en categorías tales como el consumo de recursos, las cargas medioambientales, la calidad del aire interior, la calidad de servicio, el impacto socio-económico y el transporte. Cada uno de los indicadores definidos se pondera para obtener finalmente una calificación del edificio.

Las instituciones y empresas asociadas a GBC España en colaboración con el Grupo de Investigación ABIO de la Universidad Politécnica de Madrid trabajan en la adaptación del método GBC a las características particulares de España (climatología, técnicas constructivas, condiciones de confort, normativa, factores de ponderación y valores de referencia para cada edificio) y en su aplicación a edificios significativos (Álvarez-Ude L., 2003). Como resultado, se ha desarrollado la herramienta “*VERDE*” (Macías M., Álvarez-Ude L., Rivas P., Rachmat R., 2005; Macías M., et al., 2008; Macías M., García J., 2010) que permite calcular la reducción de impactos asociados a un conjunto de criterios a lo largo del ciclo de vida, con respecto a un edificio de referencia que cumpla únicamente con las exigencias normativas mínimas.

Asimismo, hay que destacar la certificación *LEED* (Leadership in Environmental and Energy Efficient Development), creada en 1998 por el *US Green Building Council*. Este modelo de certificación (Kubba S., 2009), aplicado actualmente en más de 40 países, es una acción de carácter voluntario, llevada a cabo principalmente por organizaciones concienciadas con el impacto ambiental de sus acciones, que pretenden resaltar de este modo sus esfuerzos en materia de sostenibilidad. El certificado *LEED* establece una puntuación para los edificios en función de una evaluación tipo “*check-list*” de seis parámetros: calidad ambiental interior, materiales y recursos, eficiencia energética y renovables, eficiencia en la gestión del agua, innovación en tecnologías y procesos y sostenibilidad de la parcela, asignando una serie de puntos a cada parámetro, obteniendo finalmente el edificio tres posibles categorías: plata, oro o platino (Arenas F.J., 2007).

En un estudio llevado a cabo en 33 edificios, el método *LEED* dio como resultado que para una inversión mínima adicional del 2% de los costes de construcción se generan unos ahorros en el ciclo de vida de 10 veces el coste de la sobreinversión inicial (Kats G.H., 2003).

En Reino Unido, *BRE* (Building Research Establishment) desarrolló en 1990 la metodología *BREEAM* (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), pionera en la evaluación medioambiental de los edificios que posteriormente se ha adaptado a países como Canadá, Estados Unidos, Noruega o China. El éxito de esta metodología de gestión y diseño ambiental de edificios se basa en su capacidad de analizar una amplia gama de impactos medioambientales, considerando numerosos parámetros como la gestión del suelo, el uso de la energía y del agua, la salud y el bienestar, la contaminación del aire y del agua, el uso del transporte y los materiales de construcción. Además, BRE ha elaborado una Guía Verde que recoge de modo cualitativo el comportamiento medioambiental de más de 250 soluciones constructivas (Arenas F.J., 2007).

Finalmente, cabe mencionar también el modelo *CASBEE* (*Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency*), creado en 2004 por el *Japan GreenBuild Council - Japan Sustainable Building Consortium* y aplicado principalmente en Japón. Este modelo valora la ecoeficiencia del edificio según el ratio de eficiencia medioambiental del edificio (*BEE*), que se define como el cociente entre la calidad del edificio (que considera el ambiente interior, la calidad de servicio y el ambiente del entorno del edificio) y sus cargas medioambientales (que incluyen el consumo de energía, recursos y materiales y el impacto sobre el ambiente exterior). En función del uso, el modelo se implementa por medio de 4 herramientas: para pre-diseño, nueva construcción, edificios existentes y rehabilitación.

### 1.2.2. Iniciativas y marco legislativo regulador en Europa

El sector europeo de la construcción representa el 10,4% del Producto Interno Bruto, el 7,6 % del empleo total y el 30% del empleo en la industria. El sector está formado por 3 millones de empresas, de las que el 95% son pymes con menos de 20 trabajadores y el 93%, pymes con menos de 10 trabajadores. Alrededor de 48,9 millones de trabajadores en la UE dependen, directa o indirectamente, del sector de la construcción, de los que 16,3 millones trabajan directamente en el sector, lo que muestra el alto efecto multiplicador de este sector sobre el empleo en otros sectores. Dentro de este sector, la edificación (residencial y no residencial) es el mayor subsector. En 2007, la construcción y remodelación de edificios representaba el 80% (en torno a 1.200 millones de euros) de la producción total del sector de la construcción de la UE27, que se valoraba en 1.519 millones de euros (Ad-hoc Industrial Advisory Group - E2B PPP, 2009).

Se estima que la superficie útil de edificación residencial en Europa asciende a 16.153 km<sup>2</sup>, el 57% corresponde a los países del centro de Europa, el 39% a los países del Sur y tan sólo el 4% a los países nórdicos. Por lo que respecta a la tipología de edificios, por término medio el 50% corresponde a unifamiliares, el 40% a bloques de viviendas con menos de 8 plantas y el 10% a bloques de mayor altura (Uihlein A., Eder P., 2010).

El sector de la construcción tiene una enorme responsabilidad en la actual problemática energética y medioambiental, siendo el mayor consumidor de energía en la UE (40%), y el principal contribuyente a las emisiones de GEI, siendo responsable de alrededor del 36% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> de la UE y alrededor del 50% de las emisiones de CO<sub>2</sub> no incluidas en el trading de emisiones (Ad-hoc Industrial Advisory Group - E2B PPP, 2009).

Además, desde el punto de vista social, se estima que los ciudadanos europeos pasan cerca del 90% de su tiempo dentro de los edificios, bien sea trabajando, viviendo o pasando su tiempo de ocio o de descanso.

Por todo ello, desde la UE se están estableciendo diversas políticas comunitarias a cumplir por sus países miembros encaminadas a reducir los consumos de energía y mejorar la eficiencia energética en la edificación.

Los pilares de la política energética y medioambiental europea se concretan en la estrategia "*Hacia un Plan Estratégico Europeo de Tecnología Energética*" puesta en marcha por la Comisión Europea en Enero de 2007 para abordar los retos energéticos del siglo XXI. En este sentido, los objetivos de la UE-25 establecidos para el 2020 son reducir en un 20% las emisiones de GEI con respecto a 1990, incrementar la contribución de las fuentes renovables en el mix energético hasta alcanzar el 20%, y mejorar la eficiencia energética ahorrando el 20% del consumo de energía primaria. Es evidente que el cumplimiento de estos objetivos tendrá un impacto energético y ambiental, pero también social y económico, permitiendo crear empleo a escala local y regional (Llera E., et al., 2010; Zabalza I., et al., 2009).

La construcción sostenible es uno de los seis sectores de la Iniciativa en favor de los Mercados Líderes de Europa (*Lead Market Initiative*) adoptada por la Comisión Europea a finales de 2007. Esta iniciativa engloba un conjunto de acciones en el ámbito de la regulación, la contratación pública y la estandarización, con objeto de reducir las barreras para lanzar nuevos productos o servicios en el mercado de la

edificación residencial y no-residencial, así como la construcción de infraestructuras. A pesar de que el 40% de la demanda de obras de construcción proviene del sector público, frecuentemente se desaprovechan las posibilidades de contratación pública que podrían facilitar la demanda de soluciones sostenibles orientadas a la innovación que considerasen las evaluaciones del ciclo de vida y del coste-beneficio.

A nivel de producto, la Comisión Europea está desarrollando el nuevo Reglamento sobre Productos de la Construcción (Comité Económico y Social Europeo, 2009), que substituirá a la Directiva 89/106/CEE, transpuesta en España por el Real Decreto 1630/1992, modificado parcialmente por el Real Decreto 1328/1995. La propuesta del nuevo Reglamento contempla la obligatoriedad de declarar, mediante el marcado “CE”, el comportamiento de los productos de la construcción. La propuesta contiene un nuevo requisito esencial de los productos relativo al uso sostenible de los recursos naturales a lo largo del ciclo de la obra constructiva (diseño, construcción y demolición). Además, la nueva propuesta amplía el alcance del requisito esencial relativo a higiene, salud y medio ambiente indicando que *“las obras de construcción deberán proyectarse y construirse de forma que no supongan una amenaza para la higiene o para la salud de los ocupantes y vecinos ni tengan un impacto excesivamente elevado durante todo su ciclo de vida sobre la calidad del medio ambiente ni sobre el clima, durante la construcción, uso y demolición”*.

Las enmiendas propuestas por el Parlamento Europeo a la propuesta de Reglamento refuerzan la consideración del enfoque de ciclo de vida (Parlamento Europeo, 2009). Este nuevo requisito podría implicar que el marcado “CE” incluya un indicador sobre el índice de sostenibilidad o las emisiones de GEI del producto a lo largo de su ciclo de vida. Los Estados Miembros que decidan legislar sobre el comportamiento ambiental de los productos podrán pedir que esta información se declare como parte del marcado “CE”. En este sentido, el Comité Europeo de Normalización (CEN) tiene un mandato de la Comisión para desarrollar estándares horizontales voluntarios para el análisis del comportamiento ambiental de los edificios (Comisión Europea, 2004). Se prevé que estos estándares estén finalizados a lo largo de 2011, si bien la Comisión aún no ha especificado si estos estándares se utilizarán en el marcado “CE” o si se barajarán otras posibilidades. En cualquier caso, es de esperar que la aplicación de este nuevo Reglamento suponga un impulso al desarrollo de DAP.

En lo que respecta a los residuos, en Noviembre de 2008, se publicó una Directiva Marco sobre Residuos: la Directiva 2008/98/CE, que simplifica y actualiza normativas anteriores. La Directiva establece una serie de objetivos sobre reciclado de residuos, entre ellos los Residuos de Construcción y Demolición (RCD), exigiendo a los Estados Miembros adopten las medidas necesarias para garantizar que, antes de 2020, el 70% en peso de los RCD no peligrosos (con exclusión de materiales naturales como la tierra y las piedras) sean destinados a operaciones de reutilización, reciclado y otras operaciones de valorización de materiales, incluidas las operaciones de relleno que utilicen residuos en sustitución de otros materiales. La Directiva no sólo se enfoca a la fase de residuos propiamente dicha, sino a todo el ciclo de vida de los productos y materiales, estableciendo que el coste de la eliminación de los residuos recaiga tanto en el poseedor que los remita a un recolector o a una empresa, como en los anteriores poseedores o en el fabricante del producto generador de los residuos, en virtud del principio de que quien contamina, paga. Además se establece una jerarquía en el tratamiento de residuos, que por orden de prioridad debe considerar la prevención de residuos, la

preparación para la reutilización, el reciclado, otros tipos de valorización, como la valorización energética, y en último extremo, la eliminación. Uno de los aspectos más controvertidos de esta Directiva es la consideración de las plantas de incineración, hasta entonces consideradas como una forma de eliminación, dentro de la valorización, siempre que cumplan con unos mínimos requisitos de eficiencia energética.

Por otra parte, desde la Directiva de Prevención y Control Integrados de la Contaminación (Directiva *IPPC*), se ha impulsado la elaboración de los Documentos *BREF* (Bat Reference Document Ef) de Referencia sobre las Mejores Técnicas Disponibles para distintos sectores industriales. Estos documentos, coordinados por el *European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau*, se han desarrollado mediante un Foro de Intercambio de Información (IEF), en el que participan todos los agentes implicados. A pesar de no tener carácter vinculante, estos Documentos *BREF* constituyen una referencia para la mejora de la eficiencia energética y la disminución del impacto ambiental en diversos procesos industriales, que evidentemente incluyen la fabricación de los materiales de construcción, aunque obviamente no abarcan el ciclo de vida edificatorio completo.

Pero sin duda, una de las iniciativas más importantes desarrollada en los últimos años por la Comisión Europea fue la publicación de la Directiva 2002/91/CE relativa a la eficiencia energética de los edificios. Esta Directiva tiene como objetivo fundamental fomentar la eficiencia energética de los edificios europeos, teniendo en cuenta las condiciones climáticas exteriores y las particularidades locales, así como los requisitos ambientales interiores y la relación coste-eficiencia.

Los instrumentos establecidos por la Directiva 2002/91/CE son los siguientes:

- La adopción de una metodología de cálculo de la eficiencia energética de los edificios.
- La aplicación de unos requisitos mínimos de eficiencia energética a los edificios nuevos y a los edificios existentes que sean objeto de reformas importantes.
- La promoción de edificios de alta eficiencia energética a través de su certificación energética.
- La inspección periódica de calderas de más de 20 kW y de los sistemas de aire acondicionado de más de 12 kW, reforzando la exigencia de la Directiva 93/76/CEE.

En Mayo de 2010 se completó el proceso de refundición de esta Directiva, que ha dado lugar a la Directiva 2010/31/UE con un mayor ámbito de aplicación, aclarando, simplificando y reforzando sus disposiciones para potenciar su impacto y hacer que el sector público desempeñe un mayor papel ejemplarizante. El nuevo texto aprobado por la Eurocámara propone que todos los nuevos edificios residenciales, de oficinas y servicios que se construyan en la UE a partir de 2020 sean de energía cero, es decir, que generen la misma cantidad de energía en el cómputo anual, promoviendo la producción in situ a partir de fuentes renovables y la incorporación de equipos de alta eficiencia energética. El plazo será 2018 para edificios públicos de nueva construcción.

Al hilo de esta iniciativa, el gobierno británico ha planteado el objetivo de que todas las nuevas casas del Reino Unido estén libres de emisiones de carbono a partir de 2016, mientras que los edificios no residenciales deberán cumplir con este requisito desde 2019. En diciembre de 2008 se publicó el informe “*Definition of Zero Carbon Homes and Non-Domestic Buildings: Consultation*”, donde se recogen los parámetros de lo que se conoce en Inglaterra como “viviendas de carbono cero”, las cuales deben ofrecer un balance anual de CO<sub>2</sub> nulo, considerando las emisiones asociadas a los consumos energéticos de calefacción, ventilación, agua caliente, iluminación, electrodomésticos y otros aparatos, así como las emisiones evitadas asociadas a las exportaciones de energía del edificio hacia la red. El gobierno británico pretende construir 3 millones de nuevos hogares antes de 2020 en “ecociudades” de cero emisiones construidas totalmente con materiales reciclados.

Uno de los estándares más conocidos desarrollados en Europa es el estándar “*Passive House*”. Este estándar, propuesto originalmente en 1988 por los profesores Bo Adamson y Wolfgang Feist, fue desarrollado y validado posteriormente por el *Passivhaus-Institut* de Darmstadt (Alemania). El estándar consiste en un tipo de edificio de bajo consumo energético, cuyo diseño está orientado al máximo aprovechamiento de las tecnologías pasivas, adoptando eventualmente tecnologías solares activas, y asegurando una calidad del ambiente interior durante los meses de verano e invierno, sin necesidad de un sistema convencional de calefacción ni refrigeración (Feist W., et al., 2005). La siguiente tabla muestra las principales características de este estándar.

Demanda de calefacción máxima	Consumo de energía final máximo	Máxima transmisividad U de las ventanas	Transmisividad U de las paredes	Estanqueidad al aire a 50 Pa
15 kWh/m <sup>2</sup> año	120 kWh/m <sup>2</sup> año	0,8 W/m <sup>2</sup> K	0,1-0,15 W/m <sup>2</sup> K	0,6 renovaciones/hora

Tabla 1.2. Principales características del estándar “*Passive House*”

El cumplimiento de los valores anteriores conlleva normalmente un alto nivel de aislamiento térmico (entre 30 y 50 cm), ventanas con triple acristalamiento y marcos altamente aislantes, ausencia de puentes térmicos, ventilación mecánica con recuperación de calor, ventilación natural cruzada en verano, orientación óptima del edificio y uso de equipos de bajo consumo energético.

En la actualidad, el estándar está siendo adoptado con éxito en países centroeuropeos como Alemania y Austria, a la vez que está extendiéndose por el resto del mundo, existiendo un total de más de 15.000 edificios “*Passive House*”. Con el objeto de adaptar, estudiar y promover este estándar en España, en el año 2008 se creó la Plataforma de Edificación *Passivhaus*. Según esta Plataforma, la aplicación del estándar permitiría reducir las necesidades energéticas para calefacción y refrigeración de un edificio hasta en un 75% respecto de la forma convencional de construcción actual.

Una vez más, la característica común de los distintos estándares anteriores (edificios de cero energía, edificios de carbono cero y casas pasivas) es que no contabilizan el impacto energético y medioambiental de los materiales de construcción, por lo que, a pesar de su indudable interés, no permitirán disponer de edificios ecoeficientes en términos globales en el medio-largo plazo.

En esta línea, desde la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Dublín (Hernandez P., Kenny P., 2010) se ha definido un nuevo estándar: los “*Life Cycle Zero Energy Buildings (LC-ZEB)*”, donde la suma de la energía primaria consumida en la operación del edificio y la energía primaria incorporada en sus materiales y sistemas (incluyendo los energéticos) en la vida completa del edificio es igual o menor que la energía producida por los sistemas energéticos renovables del edificio en su ciclo de vida.

El estándar considera como indicador la energía primaria, si bien existen otros indicadores que pueden resultar adecuados como las emisiones de CO<sub>2</sub>, la exergía (De Meester B., et al., 2009) o la emergía (Pulselli R.M., Simoncini E., Marchettini N. 2009; Pulselli R.M., Simoncini E., Pulselli F.M., Bastianoni S., 2007).

A pesar de que en líneas generales, la definición es acertada, debería extenderse para incluir otros consumos indirectos de energía además de la energía incorporada. De este modo, un “edificio de cero energía de ciclo de vida” sería aquel cuya suma de su consumo anual directo (incluyendo calefacción, refrigeración, agua caliente, iluminación, etc.) y de su consumo anualizado indirecto (incluyendo la energía incorporada en materiales y sistemas, pero también la movilidad de los usuarios del edificio) fuese cero, tal como muestra la Figura 1.21.

Normalmente los edificios convencionales tienen elevados consumos directos y una cierta energía incorporada en materiales. Por su parte, los edificios de bajo consumo energético suelen presentar valores más altos de energía incorporada; incrementándose aún más en los edificios de cero energía neta, o incluso en los edificios productores de energía. A modo de ejemplo, en climatologías frías, un edificio de baja energía puede llegar a reducir hasta 10 veces la dominante demanda de calefacción, sin embargo debido a su mayor impacto en los materiales utilizados y mantenimiento, la demanda de energía al considerar el ciclo de vida de dicho edificio sólo se reduce en 2 veces (Blengini G.A., Di Carlo T., 2010). El estándar *LC-ZEB* propuesto se situaría típicamente en el cuarto cuadrante de la Figura 1.21.

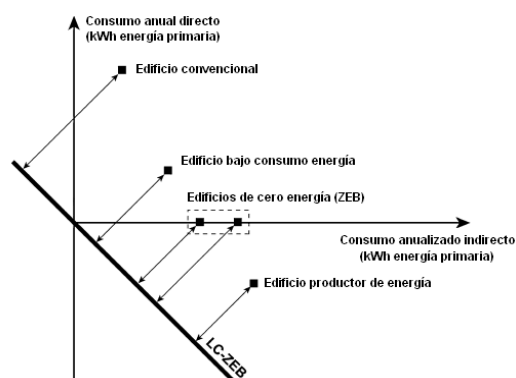


Figura 1.21. Distancia de distintos tipos de estándares de edificación al estándar *LC-ZEB*

Desde numerosos foros europeos se están desarrollando diversas iniciativas para la mejora de la eficiencia energética edificatoria. En este sentido, cabe destacar la Plataforma Tecnológica Europea de Construcción (*ECTP*), su homónima española (*PTEC*) así como la Iniciativa Europea sobre Edificios Energéticamente Eficientes: *E2B EI (Energy Efficient Building European Initiative)*. Esta iniciativa contribuye a la aplicación del Plan Europeo de Recuperación Económica, el cual afirma que



“la clave para optimizar los beneficios y minimizar los costes consiste en elegir las oportunidades para impulsar la eficiencia energética de, por ejemplo, los edificios, los sistemas de alumbrado, refrigeración y calefacción, así como de otras tecnologías tales como los vehículos y la maquinaria. A corto plazo se pueden lograr efectos positivos de gran calado para los hogares y las empresas” (Comisión Europea, 2008). Dicho Plan insta a los Estados Miembros a una acción conjunta para adoptar medidas urgentes que mejoren la eficiencia energética del parque de viviendas y edificios públicos, planteando la posibilidad de introducir una reducción del impuesto sobre bienes inmuebles para los edificios energéticamente eficientes. Asimismo se insta al desarrollo de modelos innovadores de financiación que permitan costear los gastos de rehabilitación de los edificios mediante amortizaciones basadas en los ahorros energéticos obtenidos a lo largo de los años. El Plan contempla, entre otras, una línea de investigación denominada “Edificios eficientes energéticamente” con un presupuesto de 1.000 millones de euros, en el marco de la *E2B EI*.

Por otra parte, en 2009, la Comisión Europea ha financiado la creación de plataformas y portales para el intercambio de información entre los agentes del sector de la construcción, como la Plataforma *CRIP (Construction Information Platform)* y el Portal Europeo para la Eficiencia Energética de Edificios (*BUILD UP*).

Algunos Estados Miembros han desarrollado diversas iniciativas, entre las que cabe destacar, por su interés, el “*Low Carbon Buildings Programme*”, promovido desde 2006 por el Departamento de Energía, Cambio Climático y Ahorro Energético del Reino Unido, que con un presupuesto total de cerca de 100 millones de libras, pretende reducir las emisiones de carbono de los edificios subvencionado la incorporación de tecnologías combinadas de eficiencia energética (como las bombas de calor geotérmicas), energías renovables (como la energía solar, biomasa, mini-eólica y mini-hidráulica), y microgeneración en edificios residenciales, escuelas y otros edificios del sector público.

Asimismo cabe destacar la iniciativa del Gobierno francés, que en marzo de 2009 lanzó eco-préstamos a tipo cero destinados a propietarios de viviendas que acometan obras para aislar los tejados o fachadas de su vivienda, cambiar las ventanas o puertas, mejorar la eficiencia del sistema de calefacción o bien, incorporar un sistema solar térmico para agua caliente sanitaria. La idea de los eco-préstamos es que los usuarios amorticen su inversión con el ahorro obtenido. De este modo, y conjuntamente con otras iniciativas, se pretende reducir el consumo energético de los edificios actuales al menos en un 38% en el conjunto del periodo 2009-2020. Además se pretende rehabilitar progresivamente un total de 800.000 viviendas de protección oficial (VPO), así como todos los edificios públicos.

### **1.2.3. Iniciativas y marco legislativo regulador en España**

En los últimos años se está produciendo en España un importante cambio en la normativa relacionada con la eficiencia energética en la edificación. En la actualidad el marco normativo nacional dentro de este ámbito descansa sobre tres pilares básicos: Código Técnico de la Edificación, Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (RITE) y Certificación Energética de Edificios Nuevos. A continuación se recopilan las diversas iniciativas, estrategias y normativas desarrolladas en España durante los últimos años, derivadas mayoritariamente de la transposición de las Directivas Europeas presentadas en el apartado anterior.

### **1.2.3.1. Plan de Acción 2008-2012 de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España E4**

La Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España (E4) 2004-2012, aprobada en 2003, definió los potenciales de ahorro y las medidas a llevar a cabo con objeto de mejorar la intensidad energética de la economía española, promoviendo la convergencia hacia los compromisos internacionales en materia de medioambiente (Aranda A., et al., 2007).

Durante el periodo 2005-2007, la E4 se concretó en un Plan de Acción, donde se especificaban las medidas e instrumentos, su financiación, así como los objetivos energéticos y medioambientales a alcanzar en dicho periodo. El Plan de Acción 2008-2012 completa el horizonte de la E4, focalizándose en los sectores denominados difusos, principalmente transporte y edificación, caracterizados por su atomización y patrones de comportamiento muy diversos.

Partiendo de un consumo anual de energía final en el sector de la edificación de 14.491 ktep en el año 2000, el escenario base contemplado en la E4 plantea un aumento del consumo anual hasta alcanzar la cifra de 23.584 ktep en 2012. Con las medidas planteadas se pretende reducir dicha cifra en 2012 hasta los 21.194 ktep, evitando la emisión a la atmósfera de 10.625 kt de CO<sub>2</sub>. Por tanto, entre 2000 y 2012 se prevé que el consumo de energía del sector aumente en 6.703 ktep, a un ritmo del 3% anual.

El objetivo de reducción del consumo energético sobre el escenario base de la E4 es del 10,1%, contribuyendo durante el periodo a una reducción total de 35,5 Mt de CO<sub>2</sub>, que representa el 14,9% de contribución al resultado final del Plan. Para edificios existentes se pretende disminuir en el periodo 2008-2012 el consumo del sector residencial desde 1,04 tep/hogar y año a 0,82 tep/hogar y año; y de 0,81 tep/empleado y año a 0,66 tep/empleado y año, en el caso del sector terciario.

El eje estratégico sobre el que se plantean las medidas en edificación es: *“profundizar en la certificación energética de los edificios, y hacerla visible para el público de forma que se genere una demanda de edificios de bajo consumo energético de alta eficiencia, bioclimáticos y sostenibles, motivando a la innovación en el mercado de los edificios nuevos y a una mayor demanda de rehabilitación energética de edificios existentes”*.

El Plan incluye 5 medidas estratégicas: 3 dirigidas al parque de edificios existentes, en las que se pretende ahorrar energía mejorando la envolvente y las instalaciones térmicas y de iluminación, y 2 dirigidas a los edificios de nueva construcción, promoviendo por un lado, edificios de alta calificación energética, y por el otro, la revisión de las exigencias energéticas de la normativa edificatoria. Estas medidas son:

- 1) Rehabilitación de la envolvente térmica de los edificios existentes: Se pretende actuar sobre el 3,3% del parque de edificios existentes, (en la actualidad la rehabilitación sólo afecta al 0,2% del parque actual), reduciendo su demanda energética en calefacción y refrigeración mediante la aplicación de criterios de eficiencia energética en la rehabilitación de su envolvente térmica.
- 2) Mejora de la eficiencia energética de las instalaciones térmicas de los edificios existentes: Se pretende actuar sobre el 20% del parque de las

instalaciones térmicas de instalaciones de climatización (calefacción, refrigeración y ventilación) y de producción de agua caliente sanitaria, mediante la sustitución de equipos de producción de calor y frío y de equipos de movimiento de los fluidos portadores por otros más eficientes, y la utilización de sistemas de enfriamiento gratuito y recuperación de calor del aire de extracción.

- 3) Mejora de la eficiencia energética de las instalaciones de iluminación interior en los edificios existentes: Se pretende sustituir 34 millones de lámparas en el sector doméstico y actuar sobre el 30% de la superficie iluminada en el sector terciario, sustituyendo luminarias, lámparas y equipos auxiliares e incorporando nuevos sistemas de control de encendido y regulación del nivel de iluminación.
- 4) Promover la construcción de nuevos edificios y la rehabilitación de edificios existentes con alta calificación energética: Se propone que el 17% de la nueva superficie construida en edificios sea de alta calificación energética, clase A o B, para lo que se habilita una línea de ayudas y se prevé la aplicación de posibles medidas fiscales.
- 5) Revisión de las exigencias energéticas en la normativa edificatoria: Se pretende aumentar las exigencias establecidas en el CTE para los nuevos edificios o aquellos que se rehabiliten. Además, en cumplimiento de la Directiva 2002/91/CE, se pretende aprobar un Real Decreto con el procedimiento básico de certificación energética de edificios existentes, que finalmente se va a lanzar en 2010.

Para la puesta en marcha de las medidas 1 - 4 anteriores se habilita una línea de apoyo económico anual a gestionar por parte de las Comunidades Autónomas (CC.AA). La Tabla 1.3 presenta para cada medida el ahorro energético y emisiones evitadas previstas, así como el apoyo económico y la inversión necesaria para su puesta en marcha.

Medida	Aplicación de Fondos Públicos	Ahorro directo en energía final (ktep)	Emisiones evitadas directas (kt CO <sub>2</sub> )	Apoyo público (k€)	Inversión (k€)
1) Rehabilitación de la envolvente de los edificios existentes	Subvención o bonificación tipo de interés al préstamo	1.450	5.232	175.150	2.677.295
2) Mejora de la eficiencia energética de las instalaciones térmicas de los edificios existentes	Subvención o bonificación tipo de interés al préstamo	1.685	6.452	243.315	3.719.205
3) Mejora de la eficiencia energética de las instalaciones de iluminación interior de los edificios existentes	Subvención o bonificación tipo de interés al préstamo	3.339	17.937	176.292	2.694.681
4) Promover la construcción de nuevos edificios y la rehabilitación de existentes con alta calificación energética (A ó B)	Subvención o bonificación tipo de interés al préstamo	1.315	5.322	208.914	3.969.362

Medida	Aplicación de Fondos Públicos	Ahorro directo en energía final (ktep)	Emisiones evitadas directas (kt CO <sub>2</sub> )	Apoyo público (k€)	Inversión (k€)
5) Revisión de las exigencias energéticas en la normativa	-	148	598	0	408.934
TOTAL EDIFICIOS		7.936	35.540	803.671	13.469.477

Tabla 1.3. Resumen de medidas contempladas en el Plan de Acción 2008-2012 de la E4 para el sector de la edificación

A pesar de que las medidas anteriores son necesarias, son claramente insuficientes si se pretende abordar la mejora de la eficiencia energética desde una perspectiva global e inducir unos mayores ahorros energéticos tanto directos como indirectos, ya que se olvidan aspectos tales como la energía incorporada en los materiales de construcción a lo largo de su ciclo de vida completo, las infraestructuras asociadas a la edificación, tales como el suministro de agua y energía, el sistema de recogida y tratamiento de agua y residuos y la propia movilidad de los usuarios.

### 1.2.3.2. Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia Horizonte 2007- 2012 -2020

En Julio de 2007 se aprobó la Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia 2007-2012-2020 que recoge las actuaciones necesarias para que España cumpla el Protocolo de Kyoto, limitando el crecimiento de las emisiones de GEI entre 2008-2012 al 37% sobre las del año base 1990, compromiso recogido también en el Plan Nacional de Asignación de Derechos de Emisión 2008-2012.

En lo referente al sector residencial, comercial e institucional, los objetivos se centran en la mejora de la eficiencia energética en los edificios, tanto en su envolvente como en su equipamiento, la promoción de medidas que incidan sobre el comportamiento del consumidor (que actualmente presenta con un muy bajo nivel de concienciación en esta materia), el seguimiento de los objetivos del CTE y la puesta en marcha de sistemas de calificación energética en los edificios, la promoción de la utilización de energías renovables y el desarrollo de programas ejemplarizantes en los edificios públicos. En este sentido, en Diciembre de 2009, el Gobierno puso en marcha un plan, con una inversión asociada de 2.350 millones de euros, con el objetivo de ahorrar el 20% del consumo energético en un total de 330 edificios de la Administración mediante contratos con empresas de servicios energéticos. De este modo se prevé evitar las emisiones de 254.000 toneladas de CO<sub>2</sub> al año, creando además 50.000 empleos directos e indirectos.

En definitiva, una gran parte de las iniciativas incorporadas en esta Estrategia forman parte ya del Plan de Acción 2008-2012 de la E4. No obstante, como novedad destacada, la Estrategia incluye dentro las medidas urgentes prioritarias la necesidad de desarrollar un nuevo plan de eficiencia energética que considere el ciclo de vida del sector de la edificación.

### 1.2.3.3. Real Decreto 314/2006: Código Técnico de la Edificación

La aprobación del CTE en el año 2006 supuso la superación y modernización del anterior marco normativo de la edificación en España, regulado por el Real Decreto 1650/1977 sobre normativa de la edificación, que estableció las Normas Básicas de la Edificación, como disposiciones de obligado cumplimiento en el proyecto y la

ejecución de los edificios. Dentro de este marco jurídico, se aprobaron diversas Normas Básicas desde 1979, que han conformado un conjunto abierto de disposiciones, pero que no ha llegado a constituir en sí mismo un conjunto coordinado. Por tanto, el CTE armoniza la reglamentación nacional en materia de edificación con las disposiciones de la UE vigentes en el sector, como las relativas a la libre circulación de productos de construcción dentro del mercado único europeo y las relativas a los requisitos de eficiencia energética de los edificios de la Directiva 2002/91/CE (Zabalza I., et al., 2007).

La elaboración del CTE fue competencia de la Dirección General de Arquitectura y Política de Vivienda del Ministerio de Vivienda, que contó con la colaboración del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc). En el desarrollo del CTE participaron también otras administraciones competentes en materia de vivienda, la Comisión Técnica para la Calidad de la Edificación (CTCE) y los agentes del sector.

A través del CTE se da satisfacción a los requisitos básicos de la edificación que se refieren, tanto a la seguridad estructural y de protección contra incendios, como a la salubridad, la protección contra el ruido, el ahorro energético o la accesibilidad para personas con movilidad reducida. El CTE se divide en dos partes, ambas de carácter reglamentario. En la primera, se engloban las disposiciones de carácter general y las exigencias que deben cumplir los edificios para satisfacer los requisitos de seguridad y habitabilidad, mientras que en la segunda parte están los Documentos Básicos que garantizan el cumplimiento de las exigencias básicas. En los mismos se incluyen los procedimientos que permiten determinar si el edificio cumple con los niveles de prestación establecidos en cuanto a estructuras, seguridad, prevención de incendios, salubridad, protección frente a ruido y ahorro energético.

El Documento Básico de Ahorro de Energía del CTE (CTE-DB-HE) fija cinco “exigencias básicas”. El CTE-DB-HE 1 se refiere a la limitación de la demanda energética y fija los mínimos normativos en cuanto a aislamiento, protección solar de huecos, prevención de condensaciones y estanqueidad de ventanas. Su cumplimiento puede realizarse a través de un procedimiento simplificado, o bien mediante el uso de la aplicación de simulación dinámica LIDER, desarrollada por el Grupo AICIA (Asociación de Investigación y Cooperación Industrial de Andalucía). El CTE-DB-HE 2 se desarrolla a través del RITE, mientras que el CTE-DB-HE 3 relativo a la eficiencia energética de las instalaciones de iluminación, promueve el aprovechamiento al máximo de la luz natural, exige factores de eficiencia energética en las instalaciones de iluminación artificial y obliga a la ejecución de un plan de mantenimiento de luminarias. Por su parte, el CTE-DB-HE 4 exige un porcentaje de aportación de agua caliente de origen solar dependiendo de la zona climática, el uso al que está destinado el edificio y el tipo de combustible sustituido. Y finalmente el CTE-DB-HE 5 exige, según el uso del edificio, incorporar una instalación fotovoltaica.

#### **1.2.3.4. Real Decreto 1027/2007: Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios**

El CTE-DB-HE2, aprobado mediante el Real Decreto 1027/2007 que deroga el anterior Real Decreto 1571/1998, es el Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (RITE). Este reglamento regula las exigencias de eficiencia energética y de seguridad que deben cumplir las instalaciones térmicas en los edificios, como las inspecciones de calderas y equipos de aire acondicionado.

El nuevo texto considera que los productos de la combustión pueden ser perjudiciales para la salud de las personas. Así, se establece que cuando se instalen calderas individuales en edificios existentes que se reformen, dichas calderas produzcan una baja emisión de óxidos de nitrógeno. Además se establece una fecha límite para la instalación de calderas por debajo de un rendimiento energético mínimo. Así, las calderas con marcado de prestación energética de una estrella (cuyo rendimiento a potencia nominal es mayor o igual al 84%) deben desaparecer a partir de 2010. Mientras, aquellas con marcado de prestación energética de dos estrellas (cuyo rendimiento a potencia nominal es mayor o igual al 90%) deben desaparecer a partir de 2012, al igual que las calderas de carbón. Conviene reseñar que el marcado de estrellas estaba regulado por el Real Decreto 275/1995 relativo a los requisitos de rendimiento para las calderas nuevas de agua caliente alimentadas por combustibles líquidos o gaseosos, que ha sido modificado parcialmente por el Real Decreto 1369/2007 relativo al establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos que utilizan energía.

### 1.2.3.5. Real Decreto 47/2007: Certificación Energética de Edificios

Se trata de una normativa que obliga a partir de noviembre de 2007 a certificar la eficiencia energética de edificios de nueva planta y grandes reformas (a partir de los 1.000 m<sup>2</sup> de superficie útil y la reforma de al menos el 25% de los cerramientos), estando exentos de tal exigencia los edificios abiertos, religiosos, monumentos protegidos, edificaciones agrícolas o industriales, aquellos edificios con un periodo estimado de uso inferior a 2 años o cuya superficie útil no supere los 50 m<sup>2</sup>. La obtención de la calificación energética del edificio se puede realizar a través de una opción simplificada o de una opción general, utilizando los programas informáticos de referencia (*Calener VYP* -para viviendas y pequeños edificios terciarios- y *Calener GT* -para grandes edificios terciarios-), ambos desarrollados por el grupo de Termotecnia de la Universidad de Sevilla, o bien otros programas alternativos, siempre que éstos cumplan unos requisitos establecidos. En cualquier caso, conviene hacer notar que se trata de una “auto-certificación”, que posteriormente se verá sometida al mecanismo de control externo que determine cada Comunidad Autónoma.

La etiqueta debe tener un formato normalizado, estando la escala de eficiencia energética compuesta por siete letras (de la “A” a la “G”). Existen dos escalas de calificación, una para los edificios destinados a vivienda y una segunda para edificios con un uso diferente (terciario). Las escalas son el resultado de plantear un indicador de eficiencia (qué se quiere comparar), el escenario de comparación (con qué edificios se compara el edificio objeto en estudio) y, por último, los límites de las letras representativas de la eficiencia energética del edificio en relación al indicador elegido.

	Vivienda	Otros usos (terciario)
Indicador	Emisiones específicas anuales (kg de CO <sub>2</sub> /año y m <sup>2</sup> útil).	Emisiones específicas anuales (kg de CO <sub>2</sub> /año y m <sup>2</sup> útil) derivadas del consumo energético para calefacción, refrigeración, ACS e iluminación.
Escenario de comparación	Parque edificatorio simulado representativo de los proyectos presentados en la misma localidad.	Edificio de referencia (edificio con la misma forma y orientación que cumple por la mínima el CTE).

	Vivienda	Otros usos (terciario)
Límites de la escala	Valores absolutos dependiendo de población y tipo de vivienda (unifamiliar o en bloque).	Valores relativos en función del edificio de referencia.

Tabla 1.4. Comparativa de las escalas de calificación de eficiencia energética

Tal como recoge la Tabla 1.4, en vivienda se establece como indicador las emisiones derivadas de los consumos energéticos en calefacción, refrigeración y ACS. El escenario de comparación es un parque edificatorio virtual conformado por una muestra de edificios representativa de acuerdo con las estadísticas del Censo de Población y Viviendas de 2001 sobre construcción de edificios de nueva planta. Recogida una selección de las tipologías constructivas más habituales (11 viviendas en bloque y 14 unifamiliares), se procedió al estudio de su demanda energética mediante la herramienta *Lider*, simulando dichos edificios con diferentes calidades de cerramientos y sistemas para las 4 orientaciones posibles de la fachada principal. Como resultado se obtiene para cada clima, una distribución en frecuencias de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> por m<sup>2</sup>. Esta distribución puede asimismo representarse de forma acumulada, ajustándose la muestra obtenida mediante una distribución de Weibull. En caso de los edificios de uso diferente al de vivienda (sector terciario) se contabilizan las emisiones derivadas del consumo de energía para calefacción, refrigeración, ACS e iluminación, estableciendo como patrón el edificio de referencia, que es un edificio con la misma forma, dimensiones, orientación y relación vidrio/muro cumpliendo los mínimos exigidos en el documento básico CTE-HE sobre ahorro de energía.

Numerosas partes del Real Decreto 47/2007 están abiertas a la implementación y desarrollo normativo por parte de las CC.AA, como por ejemplo, la posibilidad de añadir más indicadores al certificado de eficiencia energética, además del obligatorio “kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>”, como por ejemplo la energía incorporada en los materiales de construcción. Asimismo otra de las posibilidades abiertas es que se cree un registro de las mismas, lo que permitiría realizar un correcto seguimiento de la evolución del parque inmobiliario regional y nacional, obteniendo una valiosísima información acerca de sus características constructivas, consumos energéticos y emisiones de CO<sub>2</sub>.

#### 1.2.3.6. Catálogo de Elementos Constructivos del Código Técnico de la Construcción

En 2008 se publicó el Catálogo de Elementos Constructivos del CTE, elaborado por el IETcc, el grupo AICIA y la Confederación Española de Asociaciones de Fabricantes de Productos de Construcción (CEPCO). Este Catálogo es un instrumento de ayuda para el cumplimiento de las exigencias generales de diseño de los requisitos de habitabilidad -salubridad, protección frente al ruido y ahorro de energía- establecidos en el CTE, y contiene los materiales, productos y elementos más representativos para cubiertas, fachadas, huecos y particiones interiores, indicando las características higrotérmicas y acústicas relacionadas con las exigencias anteriores.

Sin embargo, dicho catálogo no incluye ningún tipo de información sobre el impacto energético o medioambiental de los elementos constructivos incluidos. Por ello, y en cumplimiento del Artículo 5 del CTE, en un horizonte próximo de 4-5 años, pudiera ser exigible una DAP y conveniente la elaboración de un Catálogo de

elementos constructivos con información energética y ambiental, como ampliación del catálogo existente en la actualidad, que facilite el ecodiseño de edificios.

### 1.2.3.7. Planes de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición

En 1994, Cataluña fue la primera comunidad en regular la gestión de RCD con el Decreto 201/1994, donde se considera que los RCD contienen fracciones valorizables que deben ser recuperadas y otras fracciones que deben deponerse de forma controlada para su reincorporación al ciclo natural en condiciones óptimas.

En Febrero de 2008, se promulgó el Real Decreto 105/2008, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de la construcción y demolición, que supone una superación del contexto previo en el que convivían ordenanzas municipales y normas aprobadas por CC.AA con una cierta disparidad de criterios. Este Real Decreto aplica los principios de responsabilidad del productor, prevención de residuos y corresponsabilidad entre todos los agentes que intervienen en la cadena de producción y gestión de los RCD (promotores, proyectistas, direcciones facultativas, constructores, gestores, etc.). De este modo, el productor de residuos tiene la obligación de incluir en el proyecto de ejecución de obra un estudio de gestión de RCD. El poseedor de residuos (constructor, subcontratistas, etc.), tiene la obligación de presentar a la propiedad un plan de gestión de los RCDs con unos contenidos mínimos predeterminados, y debe entregarlos a un gestor, debiendo separar los RCDs en fracciones si se superan unas cantidades determinadas (80 toneladas de hormigón, 40 toneladas de ladrillos y materiales cerámicos, 2 toneladas de metal, 1 tonelada de madera, etc.). El gestor debe llevar un registro y extender los certificados acreditativos de gestión recayendo la responsabilidad de todas las actividades de autorización, control y sanción en las entidades locales y CC.AA.

En diciembre de 2008 se aprobó el segundo Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008-2015, cuyos principales objetivos relacionados con los RCD se indican en la Tabla 1.5.

	2010	2012	2015
Separación y gestión de forma ambientalmente correcta de los residuos peligrosos procedentes de RCD	100%	100%	100%
Reciclado de RCD	15%	25%	35%
RCD objeto de otras operaciones de valorización, incluidas las operaciones de relleno	10%	15%	20%
Eliminación de RCD en vertedero controlado	75%	60%	45%

Tabla 1.5. Objetivos cuantitativos específicos sobre RCD del PNIR 2008-2015

Aunque en el PNIR 2008-2015 se señala que no ha sido posible determinar una cifra exacta de la producción anual de RCD, estudios del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino estiman dicha producción en más de 45 millones de toneladas de RCD en el año 2006, lo que supone aproximadamente 1 tonelada por habitante y año. En el año 2000, España generaba el 7,2% (13 Mt) de los RCD de la UE (180 Mt). Conviene reseñar que, si bien por volumen de residuos de la construcción, España se sitúa en la media de la UE, en lo que se refiere a reciclaje, con menos de un 5%, está muy por debajo de la media europea, que es del 28% (Ozcáriz J., Prats F., 2009).

Según el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, en 2006 existían en España 61 plantas de tratamiento donde se seleccionan, clasifican y valorizan



las diferentes fracciones de los RCD y 159 vertederos controlados. A pesar de ello, aproximadamente el 50% de los RCD generados se vierten de forma incontrolada sin tratamiento alguno. Aunque la mayor parte de los RCD son inertes o asimilables a inertes y por tanto, su poder de contaminación es bajo, su traslado a vertederos, controlados o no, además de producir un gran impacto visual, conlleva un despilfarro de materias primas que serían reutilizables, generalmente para diversos usos en el mismo sector de la construcción, a partir de unas operaciones previas de limpieza y preparación no muy complicadas.

### **1.2.3.8. Planes de Rehabilitación de Edificios y Viviendas**

En junio de 2008 se propuso un borrador de un futuro Plan de Rehabilitación de Edificios para el periodo 2009-2012 (Hernández P., Jiménez D., Nieto J., 2008). El objetivo del Plan era rehabilitar 2.250.000 viviendas (el 9% del parque total) y 150.000 edificios (el 11% del parque total), incluyendo una amplia gama de medidas, entre las que cabe destacar: la incorporación de aislamiento térmico en fachadas exteriores, patios, cubiertas y suelos, la sustitución de ventanas antiguas por ventanas de cristal doble o ventanas dobles, la colocación de toldos, persianas y otros elementos de protección solar, la mejora de la captación solar pasiva mediante la apertura de huecos a orientaciones favorables y la colocación de elementos tipo invernadero, el uso de materiales de alta inercia térmica en suelos, muros y tabiques, la incorporación de chimeneas solares que produzcan una ventilación natural, la incorporación de cubiertas verdes, el uso eficiente del arbolado y vegetación exterior, la introducción de materiales ecológicos en obras de rehabilitación, la mejora de las técnicas de deconstrucción de edificios para la recuperación de los materiales, la integración de energías renovables, el uso de grifería y electrodomésticos de bajo consumo de agua, la incorporación de depósitos de recogida de aguas pluviales para su uso en riego, inodoros y limpiezas, la sustitución de calefacciones individuales por calderas centralizadas con control individual, el empleo de calderas de baja temperatura y/o de condensación, etc.

La financiación prevista para el Plan era de 25.200 millones de euros, 1/3 a través de subvenciones directas del Estado y de las CC.AA, y 2/3 a través de créditos ICO. Los efectos previstos del Plan eran la creación de 390.000 empleos/año, una reducción de la dependencia energética con un ahorro de 30 millones de barriles de petróleo en el periodo 2009-2012 y de 13 millones de barriles anuales a partir de entonces, y una reducción estimada de las emisiones de GEI de 18 millones de toneladas hasta 2012 y 8 millones de toneladas anuales desde 2013.

En línea con este Plan, el Ministerio de Vivienda presentó, en diciembre de 2008, el Plan Estatal de Vivienda y Rehabilitación 2009-2012, que preveía 996.000 actuaciones en dicho periodo, estableciendo subvenciones de hasta 410 €/m<sup>2</sup> para la promoción del alquiler, reforzando el alquiler con opción de compra, y potenciando la rehabilitación de 470.000 viviendas focalizada en la mejora de las viviendas, su entorno y su eficiencia energética. El presupuesto del Plan es de 10.188 M€ y se espera que movilice préstamos por un importe de 34.000 M€. Para la rehabilitación de viviendas, se establecen préstamos y subvenciones, éstas últimas sólo accesibles cuando los ingresos familiares estén por debajo de un nivel determinado. Asimismo el Plan establece subvenciones para los promotores de nuevas viviendas protegidas, cuyos proyectos obtengan una calificación de eficiencia energética "A" (3.500 €/vivienda), "B" (2.800 €/vivienda) o "C" (2.000 €/vivienda).

Asimismo, el Anteproyecto de Ley de Economía Sostenible, aprobado en noviembre de 2009, pretende conseguir que en 2020 el 35% de la inversión en construcción se destine a vivienda rehabilitada. Para ello se incluyen medidas como la reforma de la Ley hipotecaria, que facilita la financiación privada y la concesión de créditos para la mejora de viviendas existentes, la reducción del IVA del 16% al 7% para las obras que persigan el ahorro energético y de agua y la mejora de la accesibilidad, y la ampliación del concepto de rehabilitación en la deducción del Impuesto sobre la Renta de las Personas Físicas (IRPF). Asimismo, y con objeto de conseguir que el 20% de las familias vivan en régimen de alquiler, se plantea la equiparación fiscal de la deducción por alquiler respecto de la deducción por compra de vivienda.

En Abril de 2010, el Real Decreto-Ley 6/2010 estableció deducciones en el IRPF e IVA reducido para la rehabilitación de viviendas *“siempre que tengan por objeto la mejora de la eficiencia energética, la higiene, salud y protección del medio ambiente, la utilización de energías renovables, la seguridad y la estanqueidad, y en particular la sustitución de las instalaciones de electricidad, agua, gas u otros suministros, o favorezcan la accesibilidad al edificio o las viviendas”*. A pesar del indudable interés de esta medida, se echa en falta por un lado, el establecimiento de niveles concretos de reducción de consumo y de aumento de rendimiento, y por el otro, el establecimiento de mayores incentivos.

#### **1.2.3.9. Otras iniciativas de interés**

La Agenda de la Construcción Sostenible es una iniciativa que engloba equipos de trabajo de la Unidad de Medio Ambiente y Sostenibilidad del Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Barcelona, de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Vallés, del Instituto Cerdà y de la Asociación de Estudios Geobiológicos GEA. Una de las actividades a destacar es el desarrollo de una base de datos de ecomateriales, con información medioambiental de diversas familias de productos (estructura, cubiertas, pavimentos, griferías y accesorios de aparatos sanitarios, pinturas, etc.), basada en el Decreto 21/2006, que regula la adopción de criterios medioambientales y de ecoeficiencia en los edificios. Para cumplir con dicho Decreto, al menos una familia de productos de los empleados en la construcción del edificio, debe disponer de un distintivo de garantía de calidad ambiental de la Generalitat de Cataluña, etiqueta ecológica de la UE, marca AENOR Medioambiente o cualquier otra etiqueta ecológica tipo I o tipo III.

Por último conviene destacar, la Guía de Edificación Sostenible para la vivienda en la Comunidad Autónoma del País Vasco (Gobierno Vasco, 2006), que recoge un extenso catálogo de buenas prácticas ambientales en el sector de la construcción de edificios, aplicables a lo largo de todo su ciclo de vida, incluyendo el planeamiento urbanístico, la gestión y desarrollo del proyecto de arquitectura, la gestión de materiales y residuos, la ejecución, el uso y mantenimiento de la vivienda y su demolición. La Guía viene acompañada de un código de valoración sobre la aplicabilidad de la propia guía a lo largo de todo el proceso analizado, pudiéndose descargar libremente desde la página web: <<http://www.gizaetxe.ejgv.euskadi.net>>.

### **1.3. Justificación y objetivos de la tesis**

---

Como se ha comentado en el apartado anterior, el marco normativo actual no considera el ACV de los edificios, fundamental para conseguir una edificación ecoeficiente, sino que se centra en los consumos de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub>

asociadas al uso de los edificios, incentivando su disminución principalmente mediante la incorporación de sistemas de energías renovables en los edificios.

A pesar del elevado porcentaje de consumo energético e impacto ambiental que tienen los edificios en su fase de uso, es imprescindible también analizar el resto de fases del ciclo de vida, con el objetivo de poder contemplar todas las oportunidades de mejora, tanto actuales como futuras. En este sentido, hay que tener en cuenta que la aplicación del actual marco normativo forzaría necesariamente una disminución de los impactos en la etapa de uso de los edificios, aumentando el peso relativo de las restantes etapas que forman parte del ciclo de vida los edificios, especialmente en lo referente al impacto de la producción de los materiales de construcción utilizados en los edificios.

En este sentido, la metodología de análisis de ciclo de vida que se propone y aplica en esta tesis, permite afrontar este reto con cuatro valores añadidos fundamentales:

- Permite encontrar opciones de reducción de impactos ambientales en toda la cadena de valor de los diferentes materiales y procesos constituyentes del edificio, sin perder de vista su coste económico.
- Evita la transferencia de impactos entre unas etapas y otras de la cadena de valor o del ciclo de vida.
- Permite integrar los resultados obtenidos a partir de los procedimientos oficiales nacionales de certificación de edificios.
- Permite añadir más allá de los indicadores seleccionados en esta tesis, otros indicadores ambientales, económicos y sociales al proceso de decisión.

La tesis proporcionará avances en la metodología, fuentes de datos y cálculos necesarios para la aplicación del análisis de ciclo de vida en la edificación, que al igual que ha sucedido con otros procedimientos, como la certificación energética, requiere un desarrollo metodológico previo antes de poder convertirse en un requisito de obligado cumplimiento a medio plazo en los edificios.

Por tanto, el objetivo general de esta tesis es desarrollar y aplicar una metodología cuantitativa (a diferencia de otras metodologías cualitativas ya existentes) de análisis y evaluación de impactos energéticos y medioambientales para los edificios que tenga en cuenta su ciclo de vida completo, considerando:

- La extracción de materias, transformación, procesado y fabricación de materiales elementos y sistemas constructivos, así como de instalaciones, identificando en todos los casos las Mejores Técnicas Disponibles (MTDs) que resulten económicamente viables, así como los materiales y soluciones constructivas más adecuadas.
- El transporte, distribución y recepción en obra, señalando los aspectos más críticos de las distintas modalidades de transporte y proporcionando soluciones de mejora.
- La ejecución, ensamblado y colocación “in situ”; evaluando el impacto en la ejecución del proyecto del edificio.

- El mantenimiento, uso y explotación del edificio, considerando e integrando, entre otros aspectos, el consumo de energía para climatización, agua caliente e iluminación y su procedencia (mix energético), el abastecimiento de agua y la movilidad de los ocupantes del edificio, así como la rehabilitación parcial/total del edificio.
- La etapa final y vida útil del edificio que abarca su deconstrucción íntegra y el cierre del ciclo de vida, analizando las posibilidades de reutilización, reciclado o valorización energética.

La evaluación de los impactos ambientales se basará principalmente en indicadores que tengan en cuenta el consumo de agua y energía, así como las emisiones de GEI. No obstante la metodología propuesta permitirá la consideración de otros indicadores ambientales, sociales y económicos, siempre desde la perspectiva de ciclo de vida y siguiendo las directrices de la normativa ISO.

Mediante la aplicación de esta metodología, se espera profundizar en el conocimiento de las especificaciones energéticas y medioambientales de distintos materiales y soluciones constructivas, que permitan avanzar en el ecodiseño de los edificios, proporcionando a los agentes del sector la información necesaria a fin de facilitar la consideración de los impactos energéticos y medioambientales en la toma de decisiones sobre la selección de materiales, proveedores y procesos productivos más ecoeficientes.

La tesis permitirá establecer, por un lado, una fotografía del impacto actual del sector edificatorio en España, y por el otro, evaluar cuantitativamente las opciones de disminución de impactos energéticos y medioambientales, analizando la influencia de los distintos parámetros de diseño del edificio, como su localización, orientación, tamaño, número de plantas, soluciones constructivas y envolvente térmica y sistemas energéticos activos. Asimismo se podrá determinar el grado de interrelación entre las distintas etapas que forman parte de la vida útil de los edificios: diseño, construcción, uso, mantenimiento, deconstrucción y disposición final, valorando cómo afecta la mejora en una de las etapas sobre el resto.

Se pretende establecer las primeras directrices básicas de una futura estrategia nacional de edificación sostenible, estableciendo unos valores de referencia de los impactos energéticos y medioambientales de los principales materiales de construcción utilizados actualmente, así como de los actuales modelos de edificación residencial, y evaluando cuantitativamente la disminución de impactos asociada a un conjunto de medidas aplicables tanto a edificios nuevos como a edificios ya existentes. La aplicación de estas directrices permitirá obtener una reducción de los impactos y una mejora de la gestión energética en toda la cadena de valor.

Si bien el carácter integrador y horizontal de la metodología garantiza su aplicación a cualquier tipo de edificación, las medidas propuestas para la disminución de impactos se cuantificarán exclusivamente para la edificación residencial, ya que a diferencia de otros edificios del sector terciario, donde existe una gran heterogeneidad en los diseños y usos, la edificación residencial -constituida básicamente por viviendas unifamiliares y viviendas en bloque- tiene un carácter mucho más homogéneo, y por tanto, posibilita una mejor extrapolación de los resultados al conjunto del parque edificatorio residencial, permitiendo evaluar el potencial de ahorro y disminución de emisiones, así como la inversión necesaria

para la implementación de técnicas y soluciones más ecoeficientes en esta tipología de edificios.

La tesis contribuirá, por tanto, a generar nuevo conocimiento y proporcionar criterios de análisis y evaluación, eficaces y prácticos, que ayuden de forma cuantificable a minimizar los impactos ambientales, ahorrar energía y contribuir a la edificación sostenible, y que resulten útiles en la toma de decisiones de las Administraciones, las empresas que proveen de productos y servicios a la construcción, las constructoras, promotoras inmobiliarias y profesionales relacionados con el proceso edificatorio y los usuarios, promoviendo un mercado con productos y servicios en los que el valor añadido diferencial se base en la minimización del impacto y su menor coste energético; esto es, impulsando y demostrando que el menor impacto es una herramienta de competitividad eficaz.

En definitiva, la tesis proporcionará una metodología integradora y horizontal que, de forma práctica y eficaz, pueda dotar al sector de instrumentos adecuados para que los edificios se proyecten con mejores criterios medioambientales y con una estrategia energética global integrada y a largo plazo, fomentando técnicas constructivas basadas en productos y procesos de menor consumo energético e impacto ambiental, así como el uso de materiales de carácter local y regional, que a la vez que disminuyen los impactos, favorecen y dinamizan la economía de ámbito regional.

#### **1.4. Contenido de la tesis**

---

La tesis se estructura en seis capítulos. En el primero de ellos se hace una descripción de la evolución y situación actual del sector de la edificación en España, analizando diversos indicadores del sector, como la tipología y el número de edificios, su antigüedad, superficie construida, contribución al PIB, etc. Asimismo se recopilan las principales líneas de actuación en eficiencia energética en la edificación, en el ámbito mundial, europeo y nacional, y se analiza el actual marco legislativo regulador en España, derivado de la transposición de la Directiva 2002/91/CE relativa a la eficiencia energética de los edificios. Finalmente se justifica la necesidad de esta tesis doctoral, señalando el objetivo general y los objetivos específicos que se persiguen.

El segundo capítulo presenta el estado del arte de la aplicación del ACV en el sector de la edificación. Se hace una descripción de la metodología general del ACV, analizando sus ventajas e inconvenientes, remarcando aquellos aspectos específicos para su aplicación en el ámbito de la edificación y justificando los distintos aspectos metodológicos que se consideran en los siguientes capítulos. Se describen asimismo las bases de datos, metodologías de evaluación de impacto y herramientas de ACV actualmente disponibles, y se presentan las principales iniciativas, proyectos y estudios desarrollados sobre ACV en la edificación, centrándose principalmente en el ámbito europeo. Finalmente se hace un análisis detallado del uso actual de la metodología del ACV en el sector de la edificación español, indicando las barreras que impiden su implantación generalizada y las principales acciones a poner en marcha para superar dichas barreras.

En el tercer capítulo se aplica la metodología general de ACV a nivel de producto, presentando un estudio pormenorizado de los distintos procesos que forman parte del ciclo de vida de los materiales de construcción más utilizados en el sector de la edificación y de diversos eco-materiales, evaluando y comparando su impacto en términos energéticos y medioambientales e identificando las etapas críticas del

proceso productivo. Asimismo se proponen y valoran, siempre que sea posible, medidas específicas, pautas y estrategias para la reducción de dichos impactos en todas las etapas del ciclo de vida de dichos materiales, identificando las Mejores Técnicas Disponibles y obteniendo una primera aproximación a las curvas ahorro-inversión de los sectores industriales a los que pertenecen los distintos materiales analizados. Este estudio permitirá obtener valores medios relativos a los impactos energéticos y medioambientales asociados a los materiales de construcción, con los poder llevar a cabo los estudios de ACV en edificios que se desarrollan en los dos siguientes capítulos.

El cuarto capítulo, se propone una metodología para la realización de estudios de ACV a nivel de edificio, en base a las directrices del estándar metodológico propuesto por el CEN/TC 350, indicando los procedimientos de cálculo para la obtención de todos los datos necesarios para realizar un estudio completo de ACV en un edificio. La metodología se aplica a dos edificios residenciales y un edificio del sector servicios ya existentes, de bajo consumo energético y ubicados en el municipio de Zaragoza. A partir de los resultados obtenidos, se analiza la relevancia e interrelación de cada una de las etapas del ciclo de vida del edificio, con objeto de proponer simplificaciones que consideren sólo aquellas etapas y aspectos más relevantes.

En el quinto capítulo, se aplica la metodología simplificada de ACV, justificada en el capítulo anterior, a dos modelos de edificación residencial especialmente seleccionados para facilitar su extrapolación: vivienda unifamiliar y bloque de viviendas, ubicados en tres climatologías representativas de España: Burgos (con alta demanda de calefacción y baja demanda de refrigeración), Madrid (con una demanda media de calefacción y refrigeración) y Sevilla (con baja demanda de calefacción y alta demanda de refrigeración). Para cada modelo, se evalúan los impactos energéticos y medioambientales, y se valoran las principales medidas de ecoeficiencia para la disminución de dichos impactos, que incluyen la adecuada orientación de la fachada principal del edificio, la correcta elección del número de renovaciones-hora para la ventilación del edificio, la elección del sistema energético activo más adecuado, el diseño de la envolvente térmica del edificio, considerando los distintos marcos y vidrios de ventanas, el número de plantas y la superficie útil del edificio, la existencia de una planta de sótano-garaje, el espesor de aislamiento óptimo, el uso de aislamientos a base de materiales naturales, la incorporación de cubiertas vegetales, el uso de bloques de termoarcilla en sustitución de los ladrillos convencionales, la utilización de materiales basados en cemento elaborado a partir de un clinker de menor impacto ambiental. Considerando los resultados anteriores y las características del parque inmobiliario nacional se hará una extrapolación de los resultados obtenidos en los modelos al conjunto del sector de la edificación en España, que permita obtener una aproximación a los impactos energéticos y medioambientales y las curvas ahorro-inversión del sector.

Por último, en el sexto capítulo se hace una síntesis del presente estudio, describiendo sus principales aportaciones a nivel de metodología, resultados científicos y estrategias dirigidas a los *“policy makers”*, indicando asimismo las nuevas líneas de investigación abiertas que permitirían profundizar en los distintos aspectos abordados en esta tesis.

La tesis está basada en los resultados obtenidos en el marco de cuatro proyectos de I+D pioneros en la aplicación del ACV a la edificación, en los que el autor ha

participado activamente conjuntamente con otros centros de investigación nacionales y europeos. Seguidamente se listan dichos proyectos:

- ENSLIC “*ENergy Saving through promotion of Life Cycle analysis in building*”, co-financiado por la Comisión Europea, dentro del Intelligent Energy Programme (EIE/07/090/SI2.467609).
- LoRe-LCA “*Low Resource consumption buildings and constructions by use of LCA design and decision making*”, co-financiado por la Comisión Europea, bajo el 7th Framework Programme (FP7-ENV-2007-1 –nº 212531).
- Proyecto Singular Estratégico CICLOPE “*Análisis del impacto ambiental de los edificios a lo largo de su ciclo de vida en términos cuantificables de consumo energético y emisiones GEI asociadas*”, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación dentro del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011 y Cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional FEDER (PSE-380000-2009-5).
- Proyecto ACV-SC “*Análisis de ciclo de vida comparativo de distintas soluciones constructivas aplicables a edificios residenciales y terciarios*”, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional FEDER (ENE2009-14714-C02-01).





## CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN LA EDIFICACIÓN

Los edificios producen impactos en el medioambiente a lo largo de todas las etapas de su vida útil, comenzando por la extracción de las materias primas y su transporte, el consumo de energía necesario para la fabricación de los materiales constructivos y su transporte desde las plantas de producción hasta la obra, los movimientos de tierra y consumos energéticos que se producen durante la construcción de los edificios, el consumo de energía para satisfacer las distintas demandas en el uso de los edificios, su mantenimiento y finalmente su demolición, así como la disposición final de todos sus elementos constructivos al final de su vida útil. Además, todas estas etapas de la vida de los edificios están fuertemente interrelacionadas, de modo que los impactos en una de las etapas condicionan los impactos de las etapas siguientes.

Por todo ello, la reducción del impacto medioambiental de los edificios requiere de unas metodologías de evaluación de impacto adecuadas (Jönsson Å., 2000) de carácter global y que incluyan todas las etapas de la vida útil de un edificio.

Dichas metodologías de evaluación deberían permitir:

- Desarrollar herramientas para evaluar las medidas más rentables para el ahorro de energía y la disminución de los impactos medioambientales durante todo el ciclo de vida de los edificios.
- Establecer objetivos a corto, medio y largo plazo dentro de una estrategia global para la disminución del impacto medioambiental del sector de la construcción.
- Asesorar a los planificadores urbanísticos, promotores inmobiliarios, constructores y diseñadores (arquitectos e ingenieros) para conseguir alcanzar los objetivos establecidos.
- Conseguir un funcionamiento y gestión ecoeficiente de los edificios, de modo que sus condiciones reales de funcionamiento se ajusten a las condiciones de diseño.

El Análisis de Ciclo de Vida constituye una de las más importantes metodologías de evaluación medioambiental. Según la Comisión Europea (*Communication on Integrated Product Policy*, COM (2003) 302), el ACV proporciona el mejor marco actualmente disponible para evaluar los impactos ambientales potenciales de los productos.

Aunque existen diversos informes y estudios (Nibel S., et al., 2005; Haapio A., Viitaniemi P., 2008; Erlandsson M., Borg M., 2003) donde se revisan las herramientas específicas existentes para aplicar la metodología de ACV a la edificación, existen todavía numerosos puntos por resolver relacionados con los indicadores medioambientales más adecuados (Todd J.A., et al., 2001), y las

posibilidades de simplificación y adaptación del ACV en función de los objetivos del estudio.

Hay que tener en cuenta que la metodología del ACV fue desarrollada principalmente para el diseño de productos de bajo impacto medioambiental. En este sentido, los edificios constituyen un tipo de “producto” muy especial, ya que tienen una vida relativamente larga (que supera mayoritariamente los 50 años), pueden sufrir modificaciones en su uso con cierta frecuencia (especialmente si se trata de edificios del sector terciario como oficinas o locales comerciales) lo que afecta a la unidad funcional utilizada en el ACV, a menudo tienen múltiples usos y funciones (ya que en un mismo edificio puede haber viviendas, garajes, oficinas, etc.), contienen una gran cantidad de materiales y componentes diferentes, se construyen en un entorno predeterminado, son normalmente únicos (rara vez se pueden encontrar dos edificios que sean iguales aún estando construidos con los mismos materiales), están integrados dentro de una urbanización en la que existen diversas infraestructuras viarias, lo cual complica el establecimiento de los límites del sistema a analizar y la asignación de los impactos medioambientales de dichas infraestructuras entre los distintos edificios que se benefician de las mismas. Todo ello conlleva que la realización de un estudio completo de ACV de un edificio no sea un proceso tan sencillo como para otros productos de consumo.

En este capítulo se presenta el estado del arte de la aplicación del ACV en el sector de la edificación. A lo largo del mismo se describe la metodología, se analizan las diferencias y similitudes existentes entre las distintas bases de datos, metodologías de evaluación de impacto y herramientas de ACV, y se presentan las principales iniciativas y proyectos desarrollados, los usuarios potenciales del ACV, las barreras que impiden su uso más extendido, y los principales estudios publicados, centrándose esencialmente en el ámbito europeo.

## **2.1. Los orígenes y desarrollo del análisis de ciclo de vida**

---

Los primeros estudios de ACV datan de finales de los años 60 y principios de los 70. El primer estudio de ACV denominado “*Resources and Environmental Profile Analysis (REPA)*” fue realizado en 1969 por el Midwest Research Institute comparando el impacto ambiental de distintos envases de Coca-Cola, si bien por motivos de confidencialidad nunca fue publicado. En esta época, hay que destacar el trabajo del profesor Ian Boustead de la “*Open University*”, que en 1972 calcula la energía total incorporada en la producción de botellas de leche (Boustead I., 1972) y durante esa década realiza numerosos estudios en distintos sectores industriales obteniendo gran cantidad de datos cuantitativos sobre un buen número de procesos industriales (Boustead I., Hancock G.F., 1979).

Asimismo, durante la década de los 70, destacan las publicaciones de Robert G. Hunt y William E. Franklin, de la *Franklin Associates Ltd.*, describiendo la metodología *REPA* y proporcionando datos de inventario de distintos productos (Franklin W., Hunt R., 1972; Hunt R., Franklin W., 1973; Hunt R., Franklin W., 1974). En lo que respecta a la edificación, en 1982 se publicó un estudio que utilizando un diagrama de flujo input/output (Bekker P.C.F., 1982) realizó una aproximación al ciclo de vida de la edificación, remarcando el agotamiento de los recursos naturales causado por este sector. Asimismo, en la década de los 80, surge la teoría termoeconómica del coste exergético (Valero A., et al., 1986), como un modo de integrar los costes energéticos del ciclo de vida y los costes medioambientales, valorando éstos últimos en unidades energéticas de un modo más objetivo.

No obstante, hasta la década de los 90 la metodología del ACV no estuvo suficientemente desarrollada siendo su aplicación bastante limitada (Boustead I., 1996). En este desarrollo hay que destacar el trabajo de diversas asociaciones y organizaciones internacionales que dio lugar en el año 1993 a dos publicaciones de referencia del ACV: *“The LCA Sourcebook”* elaborada por la *SPOLD - Society for Promotion of Life-cycle Assessment Development*, y *“Guidelines for Life Cycle Assesment: A “Code of Practice”* elaborada por la *SETAC - Society of Environmental Toxicology and Chemistry*.

Fue precisamente la *SETAC* quién en 1993 estableció la primera definición oficial de ACV, según la cual, el ACV es *“un proceso objetivo para evaluar cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad identificando y cuantificando el uso de materia y energía y los vertidos al entorno; para determinar su impacto en el medioambiente y evaluar y poner en práctica estrategias de mejora medioambiental”*.

A diferencia de otras metodologías que se centran en la mejora de los impactos medioambientales de los procesos, el ACV estudia los aspectos medioambientales y los impactos potenciales a lo largo de toda la vida de los productos y/o servicios, “desde la cuna hasta la tumba”, es decir, desde la extracción de las materias primas y la energía necesaria hasta la producción, uso y disposición de los productos desde una perspectiva global, sin ningún tipo de límites geográficos, funcionales o temporales.

En el año 1996, *SETAC* elaboró el informe *“Towards a Methodology for Life Cycle Impact Assessment”*, que sirvió de base para la elaboración de las primeras normas sobre ACV (ISO 14040-14043) publicadas entre 1997 y 1998.

En el ámbito nacional, las primeras publicaciones sobre ACV destacaban sus enormes posibilidades (Valero A., 1995; Fullana P., Rieradevall J., 1995) y marcaron de algún modo el comienzo de la difusión y aplicación de la metodología del ACV (Fullana P., Puig R., 1997) en nuestro país. Unos años más tarde, en base al ACV, y recopilando un buen número de experiencias y casos prácticos reales, se empezaron a establecer los principios básicos del ecodiseño y el desarrollo de ecoproductos (Rieradevall J., Vinyets J., 2003).

En los últimos años, diversos autores han propuesto ampliar el enfoque del ACV atendiendo a la triple “P” de la sostenibilidad: *people* (social) – *planet* (ambiental) – *profit* (económica), proponiendo un análisis de ciclo de vida para la sostenibilidad (ACVS), que integre el ACV convencional con el Análisis del Coste del Ciclo de Vida (ACCV) y el análisis del ciclo de vida social (Weidema B.P., 2006; Klöpffer W., 2008; Andrews E.S., et al., 2009; Heijungs R., Huppes G., Guinée J.B., 2010).

En la actualidad, la metodología general de ACV está totalmente estandarizada en las normas UNE-EN ISO 14040:2006 y UNE-EN ISO 14044:2006, que suponen una revisión técnica sobre las anteriores normas ya anuladas: UNE-EN ISO 14041:1998, UNE-EN ISO 14042:2000 y UNE-EN ISO 14043:2000.

En el caso de los edificios, existe un estándar metodológico actualmente en proceso de desarrollo *“Sustainability of construction works”* del Comité Técnico 350 del Comité Europeo de Normalización bajo mandato de la Unión Europea para la Normalización en el campo de la gestión integral del comportamiento medioambiental de los edificios (CEN/TC 350, 2008). Este estándar proporciona

un método de cálculo basado en el ACV para evaluar el comportamiento medioambiental de un edificio y comunicar los resultados de dicha evaluación.

## **2.2. Iniciativas y proyectos desarrollados de ACV en la edificación**

---

El concepto de ciclo de vida es una de las prioridades en las políticas y programas europeos, como lo demuestran la Comunicación sobre Política Integrada de Productos (*Communication on Integrated Product Policy*, COM (2003) 302), así como las Estrategias Temáticas sobre el uso sostenible de los recursos naturales (*Communication on a Thematic Strategy on the sustainable use of natural resources*, COM (2005) 670), y sobre la prevención y el reciclado de residuos (*Communication on Taking sustainable use of resources forward: a Thematic Strategy on the prevention and recycling of waste*, COM (2005) 666). El Plan de Acción en producción y consumo sostenibles (*Communication on the Sustainable Consumption and Production and Sustainable Industrial Policy Action Plan*, COM (2008) 397) integra estas y otras políticas relacionadas, con el objetivo de reducir el impacto medioambiental global y el consumo de recursos asociados al ciclo de vida completo de los bienes y servicios.

Para promover el conocimiento y uso de la metodología del ACV, la Comisión Europea, a través del *Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability*, ha promovido la creación de la “Plataforma Europea de Análisis de Ciclo de Vida” en colaboración con la Dirección General de Medio Ambiente. La Plataforma se creó en 2005 con el objetivo de mejorar la disponibilidad y el intercambio de información consistente y de calidad sobre ACV entre las empresas, autoridades públicas y otras entidades. Para garantizar una mayor coherencia, y por lo tanto, una mayor aceptación, de las herramientas de ACV, la Plataforma apoya el desarrollo de un sistema internacional de datos de referencia de ciclo de vida “*International Reference Life Cycle Data System*” (ILCD), una base de datos europea de ACV “*European Reference Life Cycle Database*” (ELCD), un directorio internacional de recursos de ACV, así como un foro de discusión.

Hasta la fecha se han desarrollado varios proyectos e iniciativas sobre ACV en edificios, la mayor parte basadas en la descripción de las herramientas disponibles en los distintos países para los distintos tipos de usuarios. A continuación se describen las principales conclusiones de las iniciativas más destacadas desarrolladas en los últimos años dentro de este ámbito (Tritthart W., et al., 2010).

### **2.2.1. Proyecto REGENER**

El objetivo del proyecto europeo “*REGENER-European Method for the Environmental Assessment of Buildings*” (1995-1997), desarrollado dentro del programa APAS de la DGXII de la Comisión Europea, fue establecer una metodología a nivel europeo para la evaluación del impacto medioambiental de los edificios, basada en el ACV (Peuportier B., 2001). Seguidamente se apuntan las principales conclusiones del informe final (Peuportier B., et al., 1997):

- Los primeros proyectos de demostración en los que se ha utilizado la metodología de ACV demuestran la capacidad del ACV de integrar la problemática medioambiental en los procesos de decisión.

- En base a las herramientas de ACV disponibles, la aplicación de las energías renovables en el sector de la construcción presenta un claro beneficio medioambiental. Asimismo la inversión adicional correspondiente a una mejora en la envolvente del edificio se compensa pronto en la fase de uso del edificio.
- Los resultados obtenidos difieren en función de las bases de datos utilizadas y existe una gran incertidumbre en determinados procesos, especialmente en los que se producen al final del ciclo de vida.

### **2.2.2. International Energy Agency-Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme-Annex 31**

El objetivo del Anexo 31 “*Energy related environmental impact of buildings*” de la Agencia Internacional de la Energía fue describir el impacto medioambiental de los edificios en términos energéticos. Se recopiló y presentaron las diversas herramientas e instrumentos de ACV para ayudar a la toma de decisiones por parte de los agentes involucrados en todos los procesos relacionados con la construcción. Asimismo se hizo una recopilación de las bases de datos disponibles a nivel internacional mediante una encuesta a diversos profesionales y expertos en ACV. Se identificaron todos los aspectos prácticos relevantes en la construcción que podrían abordarse desde una perspectiva de ACV, como por ejemplo: el diseño geométrico y estructural de los edificios, la elección del nivel de aislamiento, la selección de los materiales de construcción, las fuentes y los sistemas energéticos, la durabilidad de los edificios, la gestión del mantenimiento y rehabilitación, el comportamiento de los usuarios, la planificación del fin de vida de los edificios, las posibilidades de reciclaje y/o reutilización, etc.

El Anexo 31 se desarrolló entre 1996 y 1999. Sus resultados pueden encontrarse en la página web <<http://www.uni-weimar.de/scc/PRO/>>, y el informe técnico de síntesis (Nibel S., et al., 2005) está disponible en la siguiente página web: <<http://www.ecbcs.org/docs/index.htm>>.

### **2.2.3. NAHB Workshop**

En Abril de 2001, un grupo de expertos invitados por la “*National Association of Home Builders*” (NAHB) se reunieron para debatir sobre la aplicabilidad y utilidad de las herramientas de ACV en el sector de la construcción de viviendas de Estados Unidos. El informe final (Dooley R., et al., 2001) hace una revisión crítica del ACV y presenta sugerencias para mejorar su utilidad y hacerlo más atractivo entre los agentes del sector, entre las que se incluyen, una mejor explicación de las hipótesis consideradas en las herramientas de ACV y una simplificación en los interfaces de salida de datos con objeto de lograr una mejor interpretación de los resultados obtenidos por parte de los usuarios.

#### **2.2.4. Estudio sobre herramientas de ACV y Declaraciones Ambientales de Producto**

En 2002 la consultora *Price Waterhouse Coopers* realizó un estudio (Van Halen C., et al., 2002) para la Dirección General de Empresa de la Comisión Europea donde se analizaron las herramientas existentes basadas en ACV para la evaluación medioambiental del sector de la construcción de los estados miembros y Noruega, a nivel de producto y a nivel de edificio, centrándose especialmente en los esquemas de Declaración Ambiental de Producto (DAP). En el proyecto se intentó involucrar a las diversas partes interesadas: empresas de materiales de construcción, arquitectos, empresas constructoras, organismos de normalización, institutos y centros de investigación de la construcción, legisladores, etc., organizándose dos talleres de expertos en Bruselas y diversas entrevistas a expertos. Se constató la dificultad de involucrar en el proyecto a los usuarios finales del ACV (arquitectos e ingenieros principalmente) y su escasa participación en el Comité Europeo de Normalización y los procedimientos nacionales de desarrollo de las DAP.

El informe concluye que existe un bajo nivel de estandarización y coordinación en el ámbito del ACV y las DAP (por ejemplo, el número de sustancias incluidas en las DAP difieren entre los distintos países), debido a la complejidad de los modelos, las dificultades metodológicas, la falta de consenso científico, la poca sensibilidad de determinados sectores industriales a las DAP por el interés de preservar la confidencialidad de sus productos y la poca participación de las empresas y usuarios finales en los organismos de normalización y estandarización.

#### **2.2.5. Life Cycle Initiative – Grupo de trabajo de ACV en construcción y edificación**

El *UNEP (United Nations Environment Program)* y la *SETAC* promovieron la puesta en marcha en 2002 de un consorcio internacional de ciclo de vida, conocido como “*Life Cycle Initiative*” accesible a través de la página web: <[www.estis.net/sites/lcinit/](http://www.estis.net/sites/lcinit/)> con objeto de fomentar la puesta en práctica a nivel mundial del concepto de ciclo de vida.

Tras la publicación de un informe sobre el estado del arte del ACV en la construcción (Kotaji S., et al., 2003), se estableció un grupo de trabajo en esta temática. En dicho informe se describen los principales requisitos de los estudios de ACV en la construcción y edificación, como por ejemplo, la selección de una unidad funcional adecuada, que refleje los requisitos de funcionamiento del edificio o la construcción analizada. Asimismo se presentan las directrices para la consideración de escenarios futuros en las distintas etapas del ciclo de vida y se remarcan las dificultades asociadas a la asignación de cargas y establecimiento de los límites del sistema, debido a la complejidad y a la longevidad de los edificios y construcciones, proponiendo algunas soluciones al respecto.

Dentro de la “*Life Cycle Initiative*” se han desarrollado diversos simposios y talleres de expertos, entre los que cabe destacar los celebrados en Barcelona en 2005 “*Sector-specific approaches for Communication of Life Cycle Information to different stakeholders*” y en Stuttgart en 2006 “*Sustainability Communication in the Building Sector in different World Regions – Connecting Life Cycle Information with Market Impacts*”, cuyas principales conclusiones se recogen en

un informe final (Frankl P., et al., 2007). El informe señala la necesidad de involucrar a las empresas, responsables políticos, universidades y centros de investigación de cara a conseguir una mejora de las DAP mediante el uso de bases de datos estandarizadas, la normalización del formato de los informes y la inclusión de información relevante para el usuario relativa a la seguridad, daños a la salud y coste del producto. Asimismo se subrayan las limitaciones del ACV, debido a la falta de consenso sobre las metodologías de evaluación de impacto en los efectos toxicológicos, pérdidas de la biodiversidad y agotamiento de recursos abióticos.

En 2003 se llevó a cabo una encuesta desde la “*Life Cycle Initiative*” con objeto de identificar las necesidades y opiniones de los usuarios acerca de tres áreas temáticas: gestión del ciclo de vida, inventario del ciclo de vida y evaluación del impacto del ciclo de vida; y desarrollar posteriormente un plan de acción en estos ámbitos para mejorar el uso práctico de dichos enfoques del ciclo de vida. Los resultados de las encuestas (Udo de Haes H., Van Rooijen M., 2005) revelan la necesidad de incluir en la evaluación del impacto del ciclo de vida diversas cuestiones ambientales relevantes de los países en desarrollo, y ampliar dicha evaluación a diversos aspectos sociales y económicos de la sostenibilidad. Asimismo se concluye la necesidad de disponer de herramientas simples y de bajo coste.

### **2.2.6.Red Temática Europea PRESCO**

PRESCO es la Red Temática Europea de recomendaciones prácticas para la construcción sostenible en la que participan 16 países europeos. Por parte de España participa la consultora Randa Group. La visión de PRESCO es que en el futuro las herramientas para el ecodiseño, basadas en la metodología de ACV, se utilizarán en el proceso de diseño de los edificios y construcciones, a fin de hacerlos más sostenibles. Por lo tanto, desde esta Red se pretende ayudar al desarrollo de herramientas de ecodiseño basadas en ACV.

En 2005 se publicó un informe (Peuportier B., Putzeys K., 2005) que describe diversas herramientas nacionales existentes y presenta los resultados comparativos al aplicar dichas herramientas en 5 edificios diferentes. El análisis de los edificios se realizó a tres niveles: geometría simple, edificio completo, y edificio completo con diseño mejorado según las recomendaciones de PRESCO.

Una de las conclusiones del informe es la necesidad de integrar objetivos de reducción de impacto medioambiental en los pliegos para el diseño de edificios de bajo impacto. Por otra parte, se señala que existe una necesidad de formación de arquitectos e ingenieros a fin de que puedan interpretar adecuadamente los resultados de las herramientas de ACV, ya que generalmente los diseñadores de edificios no son expertos en medio ambiente y para interpretar los resultados se necesita un mínimo conocimiento de ACV.

Toda la información sobre la Red Temática PRESCO puede encontrarse en la siguiente página web: <[www.etn-presco.net](http://www.etn-presco.net)>.

### **2.2.7. Proyecto CALCAS**

Aunque no es específico del sector de la construcción, el proyecto europeo CALCAS “*Coordination Action for innovation in Life Cycle Analysis for Sustainability*” (2006-2009), financiado por el Sexto Programa Marco de la Comisión Europea, ha sido un proyecto relevante en el ámbito del ACV. El objetivo principal del proyecto CALCAS ha sido la revisión de los paradigmas básicos actuales del ACV, a fin de superar sus limitaciones actuales y profundizar aún más en el desarrollo y mejora de la normativa ISO de ACV, para mejorar su aplicabilidad en contextos difíciles y ampliar el ámbito de aplicación del ACV mediante la incorporación de aspectos de sostenibilidad social. Toda la información sobre este proyecto está disponible en la página web <[www.calcasproject.net](http://www.calcasproject.net)>.

### **2.2.8. Proyecto IMPRO-Building**

El objetivo general del proyecto “*Environmental Improvement Potentials of Residential Buildings: IMPRO-Building*” (2006-2008), financiado por la Comisión Europea-JRC, fue el análisis del potencial de mejora medioambiental de los edificios residenciales, tanto nuevos como ya existentes, incluyendo 72 tipologías relevantes en la UE-25 que cubren distintas modalidades de viviendas unifamiliares, bloques de viviendas, etc.

Los resultados del proyecto (Nemry F., et al., 2008; Nemry F., et al., 2010) muestran una visión sistemática de los impactos medioambientales del ciclo de vida de los edificios residenciales en la UE-25. También proporciona un análisis de las opciones técnicas de mejora que podrían ayudar a reducir los impactos ambientales de los edificios residenciales, con especial atención a uno de los aspectos principales, que es el consumo de energía para calefacción, evaluando los beneficios medioambientales y los costes de dichas opciones de mejora.

La siguiente figura muestra el potencial de calentamiento global en las distintas tipologías de edificios analizadas. Las marcas huecas representan los edificios nuevos, mientras que las sólidas representan los edificios existentes. Como se puede comprobar el impacto de los edificios del Norte de Europa es mayor, debido principalmente a la mayor severidad climática en los meses de invierno. También cabe destacar el menor impacto de los edificios nuevos, como consecuencia de las cada vez mayores exigencias normativas en eficiencia energética edificatoria. Asimismo hay que señalar el mayor impacto de las viviendas unifamiliares frente a los bloques de viviendas.



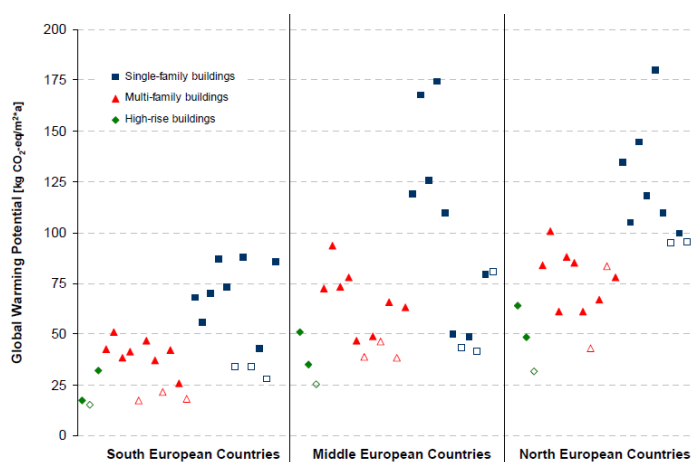


Figura 2.1. Potencial de calentamiento global de las distintas tipologías de edificios de la UE-25 analizados

El informe concluye que existe un enorme potencial de mejora en los edificios europeos. En este sentido, la aplicación de las diversas medidas propuestas basadas en la mejora de los aislamientos en cubiertas y fachadas así como la reducción de las tasas de ventilación, produciría una disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero en los edificios analizados del 30-50% en los próximos 40 años, que supondría una reducción anual de 360 MtCO<sub>2</sub>-Eq/año.

### 2.2.9. Proyecto ENSLIC

El objetivo del proyecto “*ENSLIC -Energy Saving through promotion of Life Cycle analysis in building*” (2007-2010) es desarrollar estudios de ACV en edificios de distintos países europeos, a la vez que se promueve y difunde la metodología del ACV proporcionando unas directrices simplificadas (Scarpellini S., et al., 2009; Malmqvist T. et al, 2010) a los agentes del sector de la construcción, principalmente diseñadores, arquitectos e ingenieros. El proyecto está cofinanciado por la Comisión Europea a través del “*Intelligent Energy Programme*” y está coordinado por Fundación CIRCE. En el proyecto participan 8 socios de distintos países europeos: ECOFYS BV (NL), SINTEF (NO), ARMINES (FR), CALCON Holding GmbH (DE), KTH Royal Institute of Technology (SE), IFZ - Inter-University Research Centre for Technology, Work and Culture (AT), EMI Non-profit Company for Quality Control and Innovation in Building (HU), y SEC - Sofia Energy Centre (BG).

En el proyecto se realiza, en primer lugar, un estado del arte de la aplicación del ACV en la edificación (Peuportier B., et al., 2009), para posteriormente ofrecer a los usuarios potenciales unas directrices (Glaumann M., et al., 2009) sobre los indicadores medioambientales más adecuados en función del propósito del estudio, la interpretación y presentación de los resultados obtenidos para su fácil comprensión, y la simplificación y adaptación del ACV en función del tipo de estudio a realizar. Por último, dichas directrices son aplicadas a un total de 30 edificios, ubicados en los distintos países de origen de los socios.

Toda la información sobre el proyecto, así como los informes técnicos y materiales divulgativos desarrollados pueden encontrarse en la siguiente página web <[www.enslic.eu](http://www.enslic.eu)>.

### 2.2.10. Proyecto LoRe-LCA

El objetivo del proyecto “*LoRe LCA - Low Resource consumption buildings and constructions by use of LCA in design and decision making*” (2009-2012) es promover y facilitar el uso de nuevas y mejores tecnologías en edificios e infraestructuras, que permitan reducir el impacto ambiental del ciclo de vida asociado al uso de los recursos naturales no renovables (agua, materias primas, energía y suelo) y a la generación de residuos. Como resultado del proyecto se pretende establecer recomendaciones para la mejora del marco normativo europeo aplicable al sector de la construcción.

En el proyecto se desarrollan actuaciones coordinadas dirigidas al asesoramiento tecnológico en la construcción y mantenimiento de edificios mediante el uso del ACV y otros indicadores de ecoeficiencia en el sector europeo de la construcción. Una de las actividades del proyecto es definir claramente los aspectos metodológicos relacionados con la aplicación del ACV a nivel de edificios (Peuportier B., et al., 2010). A través de un conjunto de “*case studies*” (edificios) se verifica la influencia en los resultados finales del ACV de aspectos tales como la selección de la unidad funcional, bases de datos y metodologías de evaluación de impacto, la definición de las reglas de corte, el establecimiento de escenarios para modelar el fin de vida, el listado mínimo de sustancias a considerar en el inventario, el tratamiento del CO<sub>2</sub> de origen biogénico, la asignación de impactos para los co-productos, etc.

El proyecto, financiado por el Séptimo Programa Marco de la Comisión Europea, está coordinado por SINTEF (NO) y cuenta con la participación de 7 socios europeos: Fundación CIRCE (ES), ARMINES (FR), CALCON Holding GmbH (DE), KTH Royal Institute of Technology (SE), IFZ - Inter-University Research Centre for Technology, Work and Culture (AT), EMI Non-profit Company for Quality Control and Innovation in Building (HU), y SEC - Sofia Energy Centre (BG).

Toda la información sobre el proyecto, así como los informes técnicos desarrollados pueden encontrarse en la siguiente página web <<http://www.sintef.no/Projectweb/LoRe-LCA>>.

### 2.2.11. COST Action C25

*COST (European Cooperation in Science and Technology)* constituye uno de los instrumentos europeos de apoyo a la cooperación entre científicos e investigadores de toda Europa. COST, fundado en 1971, está constituido en la actualidad por más de 200 Acciones, que reúnen a científicos de los Estados miembros de Europa, instituciones participantes pertenecientes a Estados no miembros de COST y organizaciones no gubernamentales.

El principal objetivo de la Acción *COST C25 “Sustainability of Constructions: Integrated Approach to Life-time Structural Engineering”* (2006-2010) es promover el desarrollo de una construcción sostenible en Europa a través de la recopilación y el análisis conjunto de los resultados científicos, haciendo especial énfasis en la integración de los métodos de evaluación de impacto medioambiental, la aplicación de nuevos materiales y tecnologías, la monitorización del comportamiento en el ciclo de vida y la recopilación de bases de datos de ACV y ACCV.

Toda la información sobre la Acción *COST C25* puede encontrarse en la página web: <<http://www.cmm.pt/costc25>>.

### **2.3. Estudios publicados de ACV en la edificación**

Durante los últimos años se ha incrementado sustancialmente el número de artículos científico-técnicos relacionados con el ACV y la edificación.

Con el fin de averiguar la proporción de energía incorporada en los materiales de la construcción (Yohanis Y.G., Norton B., 2002) se han realizado varios estudios desde una perspectiva de ciclo de vida, obteniendo generalmente una amplia variedad de resultados dependiendo de las condiciones climáticas y del diseño del edificio. Por ejemplo, dicha proporción puede variar entre el 9% y el 46% del total de energía total demandada en la vida útil del edificio, cuando se trate de edificios de bajo consumo energético (Sartori I., Hestnes A.G., 2007) y entre el 2% y el 38% en edificios convencionales, considerando en ambos casos edificios ubicados en países con distintas condiciones climáticas. Otros estudios afirman que en edificios convencionales, la energía incorporada se sitúa en el 10-20%, mientras que el 80-90% correspondería a la energía en la etapa de uso, y menos del 1% a la energía incorporada en la etapa de fin de vida (Kotaji S., et al., 2003).

En España, la energía incorporada en los materiales de una vivienda unifamiliar de 222 m<sup>2</sup> con garaje subterráneo, que cumpla estrictamente con los criterios de aislamiento térmico del Código Técnico de la Edificación, representa algo más del 30% de las necesidades de energía primaria durante toda su vida útil, disminuyendo dicho porcentaje en caso de que la casa no disponga de garaje subterráneo. Si bien la mayor cantidad de energía primaria se utiliza para calefacción, la energía incorporada en los materiales ocupa el segundo lugar, pudiendo llegar a suponer más del 60% del consumo de calefacción (Zabalza I., et al., 2009a). No obstante, en edificios que incrementen notablemente los espesores de aislamientos respecto a los valores establecidos por el Código Técnico, la energía incorporada en materiales puede aumentar hasta el 60%, a la vez que disminuye la energía consumida en el uso del edificio hasta el 35% (Cuchí A., 2008).

(Asif M., et al., 2007) realiza un estudio de la energía incorporada en los materiales (madera, aluminio, vidrio, hormigón y baldosas de cerámica) de una vivienda adosada de 2 pisos y 3 habitaciones ubicada en Escocia. La energía incorporada se estima en 227,4 GJ, siendo el hormigón el material de mayor impacto, con el 65% de la energía incorporada total de la vivienda.

La selección de materiales respetuosos con el medio ambiente mejora los resultados del ACV de un edificio. La energía primaria acumulada ahorrada a lo largo de 50 años de vida útil del edificio mediante la sustitución de materiales de alta energía incorporada (como el hormigón armado) por materiales de menor impacto (como bloques de tierra estabilizada, bloques huecos de hormigón, o cenizas volantes) puede ser del orden de 20% (Huberman N., Pearlmutter D.; 2008).

Por otra parte, el reciclaje de materiales de construcción (Thormark C., 2002; Thormark C., 2006) es esencial para reducir la carga ambiental asociada a los materiales incorporados en el edificio. El potencial de reciclaje podría alcanzar a lo largo del ciclo de vida el 30% y el 18% en términos de energía y emisiones de efecto invernadero, respectivamente (Blengini G.A., 2009). En algunos materiales,

como el acero o el aluminio, el uso de materiales reciclados puede conllevar un ahorro de más del 50% en la energía incorporada (Chen T.Y., 2001).

Con el fin de proporcionar unos resultados de una calidad similar a los estudios completos de ACV, pero con menores recursos, se han propuesto diversas simplificaciones aplicables a los estudios de ACV en edificios. En general, los datos de entrada deberían ser los mínimos posibles y fáciles de encontrar en el proyecto arquitectónico y de climatización del edificio. Asimismo los indicadores y las categorías de impacto elegidos, deben ser sencillos, de modo que los arquitectos, ingenieros y usuarios finales puedan comprender fácilmente los resultados. Por ejemplo, si se selecciona la eutrofización como categoría de impacto, pocas personas comprenderán el resultado. Sin embargo, indicadores como el consumo de agua, la energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> son ampliamente conocidos. Además, los indicadores seleccionados deberían poder complementar los resultados de los procedimientos de certificación energética del edificio, con el fin de intentar establecer vínculos entre el ACV y dichos procedimientos (Zabalza I., et al., 2009a).

La eliminación de etapas es una de las simplificaciones más frecuentes en los estudios de ACV en edificios. De este modo, suponiendo que el ciclo de vida de un edificio se divide en 3 etapas principales -producción, gestión y destrucción-, la etapa de gestión es la que conlleva el mayor consumo de energía a fin de satisfacer las demandas de climatización, agua caliente sanitaria y electricidad del edificio (Adalberth K., 1997a-b). Algunos autores proponen desprestigiar el impacto del transporte, sobre todo si se trata de distancias cortas y materiales ligeros, así como los materiales auxiliares, las piezas rotas y descartes, etc. (Kellenberger D., Althaus H.J., 2009).

Durante los últimos años se han publicado diversos modelos de aplicación del ACV para evaluar el impacto ambiental de la edificación en distintos países. (Lee K., et al., 2009) hace un análisis comparativo de la estructura, componentes y principales características de diversas herramientas de ACV existentes, y presenta las bases de la versión 1.0 de la herramienta de ACV SUSB-LCA, desarrollada en Corea del Sur, que proporciona el consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub> en las etapas de construcción y de funcionamiento de un edificio.

Por su parte, (Zhang Z., et al., 2006) presenta el modelo BEPAS "*Building Environmental Performance Analysis System*", basado en la metodología de ACV, que permite evaluar el comportamiento medioambiental de un edificio nuevo o existente. En BEPAS, se analizan básicamente tres aspectos del edificio relacionados con su impacto ambiental: instalaciones del edificio y consumos asociados, materiales de construcción, y ubicación/entorno, utilizando un conjunto de bases de datos para obtener finalmente un indicador medioambiental para el edificio. (Li X., et al., 2010) propone un modelo de evaluación para la etapa de construcción del edificio, basado en la valoración económica del indicador DALY (Disability Adjusted Life Years). El modelo incluye el uso de maquinaria de construcción, el movimiento de tierras y el uso de materiales auxiliares, no considerados en el anterior modelo BEPAS.

Si bien muchos modelos de ACV en edificios establecen los límites del sistema en el propio edificio, algunos autores incluyen también dentro de los límites la construcción de las infraestructuras existentes alrededor del edificio (Li Z., 2006), tales como calles, vías de acceso, aparcamientos, etc., así como la movilidad de los usuarios del edificio y el uso de dichas infraestructuras a lo largo de la vida útil del

edificio. (Li Z., 2006) analiza, a través de un caso de estudio, el impacto asociado a 3 posibles ubicaciones de un edificio japonés, remarcando la utilidad del modelo propuesto en la planificación urbanística.

(Verbeeck G., Hens H., 2009a-b) presenta un modelo de cálculo de inventario de ciclo de vida para minimizar simultáneamente el impacto energético, medioambiental y económico de un edificio, sin renunciar al confort térmico y la calidad del aire interior, y lo aplica a 4 tipologías de edificios en Bélgica. Los resultados muestran que la energía incorporada supone el 25-33% de toda la energía primaria requerida en los 30 años de vida previstos. Solamente en edificios de bajo consumo energético, la energía primaria supera a la energía en la etapa de uso, pero siendo la suma de ambas siempre inferior a la obtenida en edificios convencionales. Otra conclusión es que la energía incorporada al aplicar medidas de ahorro sobre el edificio (por ejemplo, aumentando el aislamiento) representa menos del 10% de los ahorros de energía primaria generados en los 30 años de vida, dando lugar a plazos de recuperación económica de menos de 2 años.

(Gustavsson L., Joelsson A., 2010) realiza un estudio de ACV en 11 edificios suecos de distinta tipología, tamaño y antigüedad analizando los valores totales de demanda de energía primaria y emisiones de CO<sub>2</sub>. Los resultados muestran como al disminuir la demanda de calefacción mediante un incremento del aislamiento térmico y de la estanqueidad, y una recuperación del calor del aire de extracción, la energía primaria incorporada en los materiales puede suponer hasta el 60% de la energía primaria total del ciclo de vida del edificio. No obstante el estudio concluye la fuerte dependencia de los equipos energéticos activos utilizados en el ciclo de vida del edificio, de modo que un unifamiliar construido en los años 70 calefactado mediante un sistema de cogeneración con biomasa y calefacción de distrito puede reducir la energía primaria total en más del 70%.

(Scheuer C., et al., 2003) presenta un completo estudio de ACV de un edificio de 6 pisos y 7.300 m<sup>2</sup>, ubicado en el campus de la Universidad de Michigan con una vida proyectada de 75 años. La energía primaria en el ciclo de vida del edificio asciende a 316 GJ/m<sup>2</sup>, repartiéndose entre la fabricación y transporte de los materiales constructivos (2,2%), calefacción, ventilación, refrigeración e iluminación (94,4%), agua fría y caliente (3,3%) y demolición y transporte de residuos (0,2%).

(Shukla A., Tiwari G.N., Sodha M.S., 2009) demuestra las indudables ventajas medioambientales de las casas de adobe, concluyendo que la energía incorporada total de una casa construida principalmente de adobe en la India es tan solo de 4,75 GJ/m<sup>2</sup>, lo que supone entre 1,5 y 2 veces menos que un edificio convencional, a pesar de que la energía incorporada relacionada con el mantenimiento de la casa de adobe en toda su vida útil es significativa (0,6 GJ/m<sup>2</sup>), representando el 12% de la energía incorporada total.

(Koroneos C., Kottas G., 2007) lleva a cabo un exhaustivo análisis del consumo y coste energético en la etapa de uso de un modelo de vivienda ubicado en Grecia, comparando los valores teóricos obtenidos del análisis con los valores reales. El estudio se completa con un ACV del combustible y electricidad consumida en base al Ecoindicador 95 y se concluye que las condiciones climáticas y el tipo de materiales seleccionados juegan un papel crucial en el ahorro de energía.

(De Meester B., et al., 2009) realiza una evaluación exergética del ciclo de vida de 65 tipos de viviendas de bajo consumo energético, estimado en 56 MJ/m<sup>3</sup>\*año. El

estudio muestra que la demanda de exergía acumulada anual es de 65 GJ/año. Una buena parte de este valor se debe a la calefacción necesaria para las viviendas, por lo que su reducción pasa por el uso de recursos renovables para cubrir dicha demanda. En este sentido, cabe destacar que la exergía de la irradiación solar anual en las viviendas analizadas es 4 veces mayor que la demanda de exergía acumulada anual.

(Ortiz O., et al., 2009a) realiza un estudio de ACV de una típica vivienda mediterránea de 160 m<sup>2</sup> ubicada en Barcelona que cumple con el Código Técnico de la Edificación. El potencial de calentamiento global de la vivienda en los 50 años de vida útil previstos se estima en 2,34e+03 kg CO<sub>2</sub>-Eq/m<sup>2</sup>, principalmente debido a la etapa de uso de la vivienda (90,5%), y en menor medida, a las etapas de producción y transporte (9,5%).

(Ortiz O., Castells F., Sonnemann G., 2010a-b) hace un ACV comparativo de dos edificios de viviendas situados en un país desarrollado como España y en un país en desarrollo como Colombia, según 2 escenarios de suministro energético para las viviendas: electricidad y gas natural y sólo electricidad. Se observa que el mix energético del país tiene una importante influencia en los impactos ambientales. Así, mientras en Colombia el 78% de la electricidad producida proviene de centrales hidroeléctricas, en España el mix es mucho más heterogéneo.

El importante impacto del sector turístico en España queda demostrado en un estudio de ACV realizado sobre una muestra de tres hoteles ubicados en las Islas Baleares (Rosselló-Batle B., et al., 2010). Los resultados muestran que el consumo de energía para el funcionamiento de los hoteles (180-200 kWh/m<sup>2</sup>) supone el 80% del consumo total de su ciclo de vida, mientras que las reformas de cocinas y baños representan aproximadamente el 5%. Asimismo se estima que los residuos generados, principalmente durante las etapas de funcionamiento y desmantelamiento de los hoteles, ascienden a 2.000 kg/m<sup>2</sup> construido, repartiéndose a partes iguales entre dichas etapas. Conviene destacar que el consumo durante el uso de una vivienda ubicada en la misma zona sería 3-4 veces inferior, con unos residuos generados entre 1,5-2 veces más pequeños.

El tipo de estructura de los edificios condiciona fuertemente la evaluación ambiental del edificio. Dentro de esta temática, (Xing S., et al., 2008) compara los resultados del ACV de dos estructuras constructivas diferentes -acero y hormigón- en dos edificios de oficinas ubicados en Shangai. A pesar de que la energía por metro cuadrado para la fabricación de la estructura de acero es un 25% inferior a la necesaria para fabricar la estructura de hormigón, debido al peor coeficiente de transferencia térmica, considerando el ciclo de vida completo, el edificio con estructura de acero presenta un mayor impacto en términos de energía primaria y emisiones.

Estudios de varios países han demostrado que los edificios con estructura de madera requieren menos energía y emiten menos CO<sub>2</sub> durante su ciclo de vida que los edificios con otro tipo de estructuras (Buchanan A., Levine B., 1999; Goverse T., 2001; Gustavsson L., Pingoud K., Sathre R., 2006). Por ejemplo, en (Cole R.J., Kernan P.C., 1996) se estima que en un edificio de oficinas canadiense, la energía incorporada en una estructura de acero es 1,61 veces mayor que la existente en una estructura de hormigón, que a su vez es 1,27 veces mayor que la de una estructura de madera. Asimismo (Gustavsson L., Joelsson A., Sathre R., 2010) demuestran que, bajo ciertos condicionantes, un bloque de viviendas de 8 plantas ubicado en

Suecia con estructura de madera y un sistema de cogeneración con biomasa puede llegar a producir una absorción neta de CO<sub>2</sub> en su ciclo de vida.

También existen estudios de ACV aplicados sobre distintas construcciones, aunque a día de hoy son menos numerosos que los estudios realizados en edificios. Por ejemplo, (Angelopoulou G.I., et al., 2009) propone una metodología para calcular, en base al ACV, el impacto de la construcción y mantenimiento de una autovía en función del número de carriles, su longitud y la duración del periodo de construcción.

Por otra parte, se han realizado algunos estudios de ACV aplicados a los sistemas y equipos energéticos que se pueden incorporar en un edificio. (Prek M., 2004) valora el impacto ambiental en base a la metodología de ACV de tres sistemas de distribución de calefacción para mantener una vivienda unifamiliar a una temperatura de 21°C: radiadores de acero o aluminio con tuberías de acero o cobre, suelo radiante con tuberías de polibutileno o polietileno y ventilador-convector (fan-coil) con tuberías de cobre. El análisis se hace según el Ecoindicador 95, incluyendo las etapas de fabricación, uso y disposición final. Los resultados muestran el mayor impacto del sistema de radiadores, siendo éste 3 veces mayor si las tuberías son de cobre en vez de acero. Por su parte, el sistema de suelo radiante presenta el menor impacto.

Dentro de este ámbito existen diversos estudios de ACV sobre sistemas de energía renovables que recalcan su bajo impacto. (Ardente F., et al., 2005) realiza el ACV de un equipo solar térmico por termosifón fabricado en Italia, que incluye un captador solar de placa plana convencional de 2,13 m<sup>2</sup>, un depósito de acero galvanizado de 160 l y la estructura soporte del mismo material, obteniendo unos pay-back en términos energéticos y de CO<sub>2</sub> inferiores a 2 años.

(Fleck B., Huot M., 2009) realiza un ACV comparativo entre un sistema eólico formado por un aerogenerador de 400 W, una torre de 10 m, un banco de baterías y un inversor frente a un grupo electrógeno constituido por un generador y un tanque de gasóleo, para viviendas residenciales aisladas de la red. Según este estudio, el sistema eólico conlleva una reducción del 93% de las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con el grupo electrógeno, si bien su valor actual neto es un 14% superior, debido a la falta de una “economía de escala”. En esta misma línea (Tremeac B., Meunier F., 2009) realiza un estudio de ACV comparando dos aerogeneradores de 250 W y 4,5 MW. Por cada kilovatio-hora eléctrico producido se requiere entre 0,08 y 0,33 kWh de energía primaria, causando unas mínimas emisiones entre 15,8 y 46,4 g CO<sub>2</sub>, siendo los resultados más favorables para el aerogenerador de mayor potencia. Del mismo modo, el plazo en que se recupera la energía primaria necesaria para fabricar, transportar, operar y desmantelar los aerogeneradores, mediante la producción eléctrica es tan sólo de 0,58-2,29 años.

Por otra parte, (García-Valverde R., et al., 2009) demuestra por medio de un estudio de ACV el potencial de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> de las instalaciones fotovoltaicas aisladas en los países del sur de Europa, a partir de los datos de una instalación aislada de 4,2 kWp con baterías plomo-ácido ubicada en la Universidad de Murcia. La energía primaria incorporada ronda los 130 MWh, de los que las baterías representan el 51% y los paneles el 42%. Las emisiones específicas de dicha instalación son tan solo de 131 g CO<sub>2</sub>/kWh producido, con un pay-back energético de 9 años.

Existen numerosos estudios publicados donde se aplica el ACV para valorar el impacto de diversos materiales y soluciones constructivas. (Ardenete F., et al., 2008) realiza un ACV de los tableros de fibras de kenaf (*Hibiscus cannabinus*) producidos por una empresa italiana, utilizados como aislamiento térmico de edificios, analizando asimismo diversas opciones de mejora. Las fibras de kenaf, utilizadas también en la industria papelera, proceden de una planta herbácea de origen tropical y crecimiento rápido que se adapta muy bien a las condiciones climáticas de los países mediterráneos. Los resultados muestran que el uso de fibras naturales conlleva una reducción significativa de los impactos ambientales en comparación con otros aislamientos a base de materiales sintéticos. Asimismo, dentro del ámbito de los aislamientos térmicos, (Anastaselos D., Giama E., Papadopoulos A.M., 2009) desarrollan y aplican una herramienta de evaluación en base al ACV, capaz de analizar aspectos energéticos, ambientales y económicos de distintas soluciones y materiales de aislamiento, demostrando las ventajas de los sistemas de aislamiento térmico exterior (*External Thermal Insulation Composite Systems-ETICS*) en un edificio ubicado en Grecia, que pueden llegar a disminuir los consumos energéticos y las emisiones en el ciclo de vida hasta un 20%.

(Nebel B., et al., 2006) aborda el ACV de distintos recubrimientos de madera para el suelo: parquet macizo, parquet multicapa, tableros sólidos y bloques de madera; cubriendo aproximadamente el 70% de toda la producción de suelos de madera en Alemania. Los resultados muestran que las diferencias entre los distintos tipos de parquet son poco significativas. Las oportunidades más importantes de mejora se centran en los procesos de colocación, acabado superficial y mantenimiento. En este sentido, el Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico podría reducirse significativamente en función de los pegamentos y barnices utilizados en cada una de dichas etapas.

El impacto ambiental de los materiales de cambio de fase en el ciclo de vida de un edificio mediterráneo ha sido evaluado experimentalmente (De Gracia A., et al., 2010). Los resultados recomiendan el uso de sales hidratadas, cuyo impacto de fabricación es un 75% menor que las parafinas. Asimismo se deduce que la incorporación de materiales de cambio de fase en la envolvente del edificio, aunque disminuye el consumo de energía durante el funcionamiento, no reduce significativamente el impacto global en toda la vida útil del edificio, necesitándose 25 años para que el impacto energético durante la fabricación de las sales hidratadas se vea compensado por los ahorros energéticos obtenidos en el uso del edificio. No obstante, considerando una vida útil del edificio de 100 años y condiciones de verano durante todo el año, el uso de estos materiales podría reduciría el impacto global del edificio en un 10%.

(Saiz S., et al., 2006) evalúa los beneficios medioambientales, en base a la metodología de ACV, proporcionados por una cubierta vegetal en un bloque residencial de 8 plantas de Madrid. Se concluye que, a pesar de que el ahorro obtenido en el consumo de energía anual respecto a una cubierta convencional es poco más del 1%, la demanda de refrigeración del edificio en verano se reduce en más del 6%, llegando en los pisos superiores al 25% durante las horas pico; mientras que otros impactos ambientales se reducen en un rango del 1-5,3%.

Dentro de este mismo ámbito, (Gazulla C., 2005) realiza el ACV de cuatro sistemas de rehabilitación de cubierta: EPDM + poliestireno extruido + grava, lana de roca + betún, poliestireno expandido + betún, poliuretano + betún + cerámica; en un edificio de 4 plantas. En todos los sistemas, el balance energético de la rehabilitación es positivo, es decir, se ahorra entre un 150 y un 235% de la energía



que se consume a lo largo de su ciclo de vida, con una disminución de la demanda de energía en calefacción y refrigeración de las viviendas entre un 19% y un 26%. No obstante, el balance económico es negativo en todos los sistemas, ya que sus costes son superiores al ahorro alcanzado en 20 años.

(Koroneos C., Dompros A., 2007) desarrolla un estudio de ACV, incluyendo la adquisición de materias primas, la fabricación, el embalaje y el transporte, de los ladrillos producidos en una planta situada a las afueras del municipio de Thessaloniki (Grecia). Los resultados señalan que los procesos para la producción de ladrillo son muy intensivos en energía. Las emisiones de CO<sub>2</sub> son predominantes y, generalmente, la mayoría de las emisiones se deben al consumo de energía en la planta de producción, que, en el caso analizado, se trata principalmente de gasóleo, coque de petróleo y electricidad.

(Van der Lugt P., et al., 2006) realiza una evaluación comparativa en términos medioambientales y económicos del uso de las cañas de bambú como material de construcción en edificios, estructuras y puentes en los países occidentales de Europa frente a otros materiales más comunes como el acero, el hormigón o la madera. Se concluye que bajo ciertos límites del sistema y siguiendo ciertas recomendaciones, el bambú puede ser un material sostenible y competitivo. Prácticamente todo su impacto se deriva del transporte marítimo, ya que el bambú crece principalmente en las regiones tropicales de Asia, Latino América y África, por lo que, en caso de ser utilizado en dichas regiones, su impacto es casi nulo.

(Petersen A.K., Solberg B., 2005) evalúa, desde el punto de vista del ACV, los efectos ambientales de la sustitución de productos como el acero o el hormigón por productos de madera en los edificios de Noruega y Suecia, concluyendo que la madera es la mejor alternativa para minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero, causando también menos emisiones de SO<sub>2</sub> y menos residuos. La cantidad de gases de efecto invernadero evitadas al sustituir acero por madera es de 36-530 kg de CO<sub>2</sub>-Eq/m<sup>3</sup>; mientras que al sustituir hormigón por madera asciende a 93-1.062 kg CO<sub>2</sub>-Eq/m<sup>3</sup>. No obstante, se recalca que según los tratamientos que se hagan sobre la madera pueden darse ciertos efectos toxicológicos sobre la salud humana y los ecosistemas.

Por otra parte, en la Universitat Politècnica de Catalunya se han realizado diversos estudios de ACV (Baldasano J.M., et al., 2005a-d) para estimar el consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub> asociados a la producción, uso y disposición final de distintas tipologías de ventanas (PVC, aluminio y madera), tuberías (PVC, PEHD, PP, fundición y hormigón), cables (PVC, XLPE y PE), y láminas (PVC-P, EPDM y materiales bituminosos), utilizando, en todos los casos, datos procedentes de diversas fuentes bibliográficas.

Seguidamente se presentan varias tesis doctorales acerca de la evaluación y posibilidades de disminución de los impactos medioambientales asociados al sector de la edificación, algunas de las cuales utilizan directa o indirectamente la metodología de ACV.

En este sentido, dicha metodología se ha aplicado a diversos materiales constructivos. (Johnson T., 2006) realiza una evaluación detallada del impacto ambiental asociado a la construcción de una típica estructura de hormigón armado (acero y hormigón) para un edificio de oficinas en Boston (EE.UU.) utilizando el ACV para valorar el consumo de energía, las emisiones dañinas y el agotamiento

de los recursos naturales; y remarcando el alto impacto de ambos materiales, comúnmente utilizados en la edificación.

(Cardim de Carvalho A., 2001) estudia, por medio del ACV, los efectos ambientales de la producción de cemento, analizando los datos de entrada y salida de los inventarios de ciclo de vida existentes y proponiendo las bases fundamentales para elaborar un inventario nacional de la producción de cemento aplicable a España y a otros países con la misma técnica productiva.

Aunque no constituye estrictamente un estudio de ACV, (Gilabert A.M., 2007) hace una evaluación de los contaminantes emitidos exclusivamente durante la fabricación de baldosas en la región de Castellón, sin contabilizar los procesos de infraestructura (construcción de hornos, maquinaria e instalaciones), ni de extracción de arcillas y transportes. El estudio evalúa las emisiones en planta de una tonelada de baldosas en el año 2001, mediante una aproximación al inventario del ciclo de vida, extrapolarlo posteriormente a toda la producción anual. Se constata una reducción de las emisiones entre 1992 y 2001 y una dificultad para seguir reduciéndolas a corto plazo al haber alcanzado un cierto techo tecnológico.

(Bovea M.D., 2002) realiza un estudio detallado de los materiales y procesos de fabricación más utilizados en el mobiliario de las oficinas, realizando un inventario del ciclo de vida de cada uno de ellos a partir de información de campo recopilada en empresas del sector ubicadas en la Comunidad Valenciana y completada con información bibliográfica e inventarios disponibles en bases de datos comerciales. Además, en base a la metodología de ACV, se establecen recomendaciones para disminuir el impacto ambiental de tres modelos de mesas de oficina, obteniendo una reducción del impacto del 5-13%. Asimismo, por medio de una encuesta, se determina que los consumidores estarían dispuestos a pagar entre un 14% y un 21% más del precio inicial de un producto por una versión “ecológica” del mismo.

(Mendoza E.M., 2001) realiza diversas aportaciones metodológicas en los distintos pasos necesarios para desarrollar estudios de ACV de cualquier tipo de materiales (no sólo materiales de construcción), que se implementan en una herramienta informática aplicable a casos reales de estudio. Dichas aportaciones abarcan la descripción de los elementos del sistema, la construcción de inventarios, el uso de bases de datos reales en los cálculos, la comparación de las metodologías de evaluación de impactos ambientales, la definición, evaluación y análisis de situaciones tanto de producción, como de consumo o gestión ambiental del producto que permita el estudio de alternativas, aplicables a cada material y a cada etapa de su ciclo de vida.

Por otra parte, la metodología general de ACV se ha aplicado, con diversas hipótesis y suposiciones, a distintas tipologías de edificios. (Junnila S., 2004) cuantifica y compara el impacto ambiental causado por tres edificios de oficinas finlandeses en las distintas etapas de su ciclo de vida. Los resultados muestran que la etapa de operación del edificio es la que conlleva mayores impactos en cuanto a potencial de cambio climático, acidificación y eutrofización, mientras que la fabricación de los materiales de construcción ocasiona mayores impactos en el “smog” de verano y en el uso de metales pesados. Asimismo se señalan los aspectos que más influyen en el impacto ambiental, como los consumos energéticos en la operación del edificio.

(Matasci C., 2006) realiza el ACV de 21 edificios pertenecientes a 4 tipologías constructivas en Suiza (viviendas unifamiliares, bloques de viviendas, edificios de

servicios e industriales), analizando la contribución de las diferentes fases del ciclo de vida y las principales causas que afectan al impacto medioambiental. Los resultados obtenidos muestran el alto impacto de la etapa de uso del edificio, responsable del 38-70% del impacto total, seguida del mantenimiento con el 16-40% del impacto, la construcción con el 11-25% del impacto y la eliminación con el 2-6% del impacto. El mayor impacto se debe al consumo de energía para calefacción del edificio, muy condicionado por la compactidad y la superficie acristalada del edificio. Asimismo se concluye que el impacto de los bloques de viviendas es generalmente menor que el de las viviendas unifamiliares.

Finalmente se han abordado diversos aspectos relacionados con la disminución de impactos ambientales, la sostenibilidad y el ciclo de vida de las edificaciones. (Cuadrado J., 2009) define una metodología general de evaluación de la sostenibilidad, particularizada en el ámbito de las construcciones industriales, validada mediante su aplicación a tres casos de estudio, que abarcan distintos tamaños, tipologías y procesos productivos. Dicha metodología plantea el estudio de la sostenibilidad en base a una serie de requerimientos específicos de seguridad, funcionalidad, imagen, aspectos sociales, económicos, y medioambientales, teniendo en cuenta 4 fases en el ciclo de vida de la edificación, diseño y planeamiento, construcción, vida útil y reintegración. La metodología planteada permite cuantificar mediante un valor numérico, el conjunto de criterios de evaluación definidos, estructurados jerárquicamente, a través de la importancia relativa que presentan dentro del modelo y facilita la clasificación o etiquetado de las construcciones en base a su sostenibilidad.

(López V.M., 2001) analiza las posibilidades de aplicar el concepto de sostenibilidad en el sector de la construcción, y específicamente en la construcción de edificios, a través de la adecuación de las fases de planificación, diseño, construcción y desensamblaje de los edificios. Los principales impactos ambientales de la edificación son analizados, proponiendo una sinergia de acciones a desarrollar desde distintos ámbitos.

(Arenas F.J., 2007) analiza los impactos ambientales locales y globales que se producen en el sector de la construcción, desde la extracción de los materiales de construcción hasta su tratamiento como residuo, pasando por las fases de construcción y uso. Se examinan los criterios ambientales para una construcción sostenible relativos a la arquitectura bioclimática, como la ubicación e integración de la edificación en su entorno, la orientación y calidad de aire interior, la implantación de sistemas de ahorro energético, etc., y se analiza el marco legal de los residuos de construcción y demolición, estableciendo algunas recomendaciones de mejora, como la exigencia de una fianza para aquellos productores o poseedores de residuos, que sea devuelta cuando se acredite el reciclado o reutilización de dichos residuos. La tesis pone de manifiesto que en España los criterios de sostenibilidad ambiental relativos a eficiencia energética, arquitectura bioclimática y energías renovables no se aplican en la construcción industrial, quedando pendiente un Plan Nacional de Edificación Sostenible que desarrolle la Ley de Ordenación de la Edificación y el Código Técnico Edificación.

Por último, (López F., 2006) define el consumo energético de un edificio como una función de la demanda energética del edificio, el rendimiento de los sistemas energéticos que satisfacen dicha demanda, así como el perfil de uso y gestión previsto (en edificios nuevos) o medido (en edificios existentes), realizando una parametrización, análisis y evaluación cuantitativa del uso y la gestión de los edificios, que resulta ser el principal factor determinante del consumo energético de

un edificio, aunque no se valoran otros aspectos relacionados con el ACV, como por ejemplo, la energía incorporada en los materiales.

## 2.4. Metodología del análisis de ciclo de vida

La metodología general del ACV consta de cuatro fases, si bien es posible realizar estudios simplificados, en los que se elimine alguna de ellas:

- Definición de objetivos y alcance, donde se establece la finalidad del estudio, los límites del sistema, los datos necesarios y otras hipótesis.
- Análisis de inventario, donde se cuantifican todos los flujos de energía y de materiales que entran y salen del sistema durante toda su vida útil.
- Evaluación de impactos, donde se realiza una clasificación y evaluación de los resultados del inventario, relacionándolos con efectos ambientales observables a través de un conjunto de categorías de impactos seleccionadas tales como el agotamiento de los recursos, el calentamiento global, la disminución de la capa de ozono, la toxicidad o el uso del suelo.
- Interpretación, donde los resultados de las fases precedentes son analizados conjuntamente, en consonancia con los objetivos del estudio, con objeto de establecer las conclusiones y recomendaciones finales.

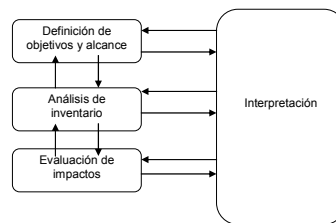


Figura 2.2. Metodología general del ACV

La metodología del ACV tiene un carácter dinámico, y las cuatro fases de las que consta están interrelacionadas. Por ello, a medida que se obtienen resultados se pueden reconsiderar las hipótesis planteadas o refinar los datos utilizados en cualquiera de las fases (Aranda A., et al., 2006).

Un problema habitual que surge al aplicar la metodología del ACV en el proceso de diseño de un edificio es que en las fases preliminares de diseño las posibilidades de optar por distintas soluciones de diseño son muy amplias, mientras que la disponibilidad de datos para realizar el estudio de ACV es pequeña, lo que condiciona la precisión de los resultados obtenidos. Conforme va avanzando el proceso de diseño, y se van acotando las opciones de diseño como consecuencia de los diversos condicionantes externos, mejora la disponibilidad de datos y, por tanto, la precisión de los resultados, si bien las posibilidades de utilizar éstos para la propuesta de diseños alternativos son cada vez menores.

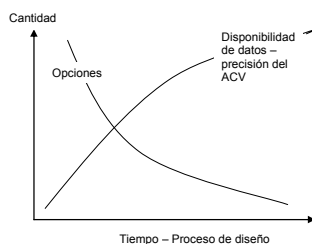


Figura 2.3. Opciones de diseño de un edificio frente a disponibilidad de datos. Fuente: (Glaumann M. et al., 2009).

Hay distintas formas de afrontar este problema, todas ellas relacionadas con buscar el modo de conseguir una mejor información sobre las opciones alternativas existentes al principio del proceso de diseño e intentar disponer de unos primeros resultados estimativos lo antes posible, para lo cual es necesario disponer de las aplicaciones más adecuadas en cada momento (Glaumann M. et al., 2009).

#### 2.4.1. Definición de objetivos y alcance

El objetivo y alcance de un estudio de ACV deben definirse claramente y ser consistentes con la aplicación que se persigue. En esta fase se concreta el motivo por el que se lleva a cabo y se describe el sistema objeto del estudio, así como la utilización prevista de los resultados.

El alcance debe estar suficientemente definido para asegurar que la amplitud, profundidad y detalle del estudio son compatibles y suficientes para alcanzar el objetivo del mismo. En cualquier caso, como el ACV es una técnica iterativa, el alcance del estudio puede ser modificado durante la realización del estudio a medida que se disponga de información adicional.

Es evidente que en el caso de los estudios de ACV en edificios, el objetivo y alcance pueden variar notablemente en función del tipo y uso del edificio, de su localización geográfica y del momento de la vida del edificio en que se haga el estudio: etapa preliminar de diseño, construcción, uso, rehabilitación o demolición. No obstante, si se pretende comparar los resultados del ACV de distintos edificios, deberán utilizar la misma unidad funcional y consideraciones metodológicas equivalentes como la función, los límites del sistema, la calidad de los datos, la evaluación de impacto, etc.

En la definición del alcance del ACV se consideran los siguientes aspectos:

La función del sistema a estudiar, que define sus características de operación. Hay que destacar que un sistema puede tener más de una función. Por ello, si se pretende comparar 2 sistemas diferentes, es preciso que desarrollen la misma función. Por ejemplo, no es posible comparar un estudio de ACV de un edificio que contiene viviendas y oficinas con otro destinado sólo a viviendas, ya que la función desempeñada por cada uno de ellos es distinta. Del mismo modo, tampoco es posible comparar el impacto de soluciones constructivas a aplicar en edificios ubicados en distintos países, y que, por tanto, se rigen por normativas diferentes.

La unidad funcional, que constituye la unidad de referencia para todas las entradas y salidas del sistema que se obtendrán en el análisis de inventario. El “tamaño” de

la unidad funcional depende del tipo de estudio que se pretenda realizar. Un ejemplo típico de unidad funcional aplicado a edificios podría ser: un edificio (o bien 1 m<sup>2</sup> del mismo, o incluso el espacio del mismo necesario para que 1 persona pueda vivir o trabajar) diseñado para un determinado número de residentes o trabajadores suponiendo una ocupación del 100%, en una localización concreta, cumpliendo unas normativas determinadas relativas al confort térmico, salubridad, limitación de demanda energética, etc., durante una vida útil estimada de 50 años, que se utiliza a menudo como valor predeterminado (Malmqvist T., et al., 2010), ya que, por múltiples motivos, es muy difícil prever la duración real de un edificio. Es evidente que una reducción de la vida útil prevista para el edificio, disminuye los impactos medioambientales en la etapa de uso del edificio, aumentando la relevancia de los impactos asociados a los materiales de construcción. En este sentido, un análisis de sensibilidad sobre la vida útil del edificio puede proporcionar interesantes resultados. Por tanto, en estudios de ACV comparativos de edificios, debido a las múltiples funciones que puede desempeñar un edificio y las distintas exigencias normativas existentes en función de su ubicación, se suele utilizar el concepto de “equivalente funcional” (CEN/TC 350, 2008), definido como la unidad de referencia que cumple con la legislación vigente y con los requisitos de la propiedad y que considera la cantidad analizada (1 m<sup>2</sup>, 1 m<sup>3</sup>, 1 edificio, etc.), la/s función/es (proporcionar espacio para vivir y/o trabajar, etc.), la calidad de dicha/s función/es (requisitos de confort térmico, calidad de vida, etc.), el patrón de uso (porcentaje de ocupación), la ubicación del edificio (condiciones ambientales de radiación, humedad y temperatura, requisitos normativos, etc.) y la duración del edificio (50 años, 80 años, etc.).

El sistema, que se define como el conjunto de procesos unitarios o subsistemas necesarios que, interconectados material y energéticamente, permiten la presencia del producto estudiado en el mercado.

Los límites del sistema, que se definen como los procesos unitarios que serán incluidos dentro del sistema estudiado. Hay que considerar que no es necesario gastar recursos para la cuantificación de las entradas y salidas que no cambien significativamente las conclusiones del estudio. Evidentemente cuanto más información se recoja, más extenso será el estudio, más tiempo se tardará en realizarlo y más costoso será. Por todo ello, es necesario establecer unos límites en consonancia con los objetivos del estudio, que además posteriormente puedan ser refinados sobre la base de los resultados preliminares. En cualquier caso, toda decisión de omitir etapas del ciclo de vida, procesos o entradas/ salidas debe quedar claramente justificada y los criterios o reglas de corte utilizadas para fijar los límites del sistema deben garantizar la precisión y representatividad de los resultados obtenidos.

En el caso de edificios, según las recomendaciones del CEN (CEN/TC 350, 2008) el sistema a analizar debe incluir las siguientes 4 etapas o subsistemas del edificio: producción, construcción, uso y disposición final, tal como se indica en la Tabla 2.1.

En los estudios de ACV en edificios, los impactos medioambientales se derivan fundamentalmente de la etapa de uso de los edificios, si bien hay una gran variabilidad en función del diseño y la climatología del edificio, tal como quedó patente en el apartado 2.3.

Etapa	Aspectos incluidos
Producción del edificio	Materias primas
	Transporte
	Fabricación
Construcción del edificio	Transporte
	Procesos on-site de construcción
Uso del edificio	Mantenimiento
	Reparación y reemplazo
	Rehabilitación
	Consumo de energía final: calefacción, refrigeración, ventilación, agua caliente sanitaria e iluminación
	Consumo de agua
Disposición final del edificio	Deconstrucción
	Transporte
	Reciclado / reutilización
	Disposición final en vertedero / incineradora




Tabla 2.1. Etapas del ciclo de vida de un edificio según el estándar CEN/TC 350

Dentro del alcance, hay que definir también las categorías de impacto y metodologías de evaluación de impacto que se van a emplear en el estudio. Cada método de evaluación difiere en las categorías de impacto consideradas y en el peso asignado a cada una de ellas. En el apartado 2.6 se describen detalladamente los métodos de evaluación de impacto más comunes.

La siguiente tabla muestra las categorías de impacto recomendadas por el Comité Europeo de Normalización para llevar a cabo estudios de ACV en edificios, sobre la base del mayor consenso científico existente en las metodologías para el cálculo de dichas categorías de impacto (CEN/TC 350, 2008; Ilomäki A., 2009).

Categoría de impacto	Unidad
Calentamiento global potencial	kg CO <sub>2</sub> -equivalentes
Destrucción de la capa de ozono estratosférico	kg CFC-11-equivalentes
Acidificación de la tierra y el agua	kg SO <sub>2</sub> -equivalentes
Eutrofización	kg PO <sub>4</sub> -equivalentes
Formación de ozono troposférico	kg C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> -equivalentes
Residuos radiactivos	kg
Uso de energía primaria renovable / no renovable	MJ
Uso de los recursos de agua dulce	m <sup>3</sup>
Uso de recursos renovables / no renovables (distintos de la energía primaria)	kg
Uso de recursos reciclados / reutilizados (distintos de la energía primaria)	kg
Materiales para reciclaje o para valorización energética	kg
Residuos peligrosos y no peligrosos para disposición final	kg

Tabla 2.2. Categorías de impacto sugeridas para ACV en edificios (CEN/TC 350, 2008; Ilomäki A., 2009)

Otro aspecto a definir dentro del alcance son los requisitos de calidad de los datos, que especifican las características de los datos necesarios para el estudio. Estos requisitos deberán definirse de modo que permitan lograr los objetivos del estudio. Los requisitos de calidad de los datos deberían cubrir la cobertura temporal (antigüedad de los datos utilizados), la cobertura geográfica (local, regional, nacional, continental, global, etc.), la cobertura tecnológica (mejor tecnología disponible, media ponderada de tecnologías, etc.), la precisión, amplitud y

representatividad de los datos, la consistencia y reproducibilidad de los métodos usados en el ACV, las fuentes bibliográficas de los datos y su representatividad, y la incertidumbre de la información.

### 2.4.2. Análisis de inventario

El análisis de inventario comprende la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas relevantes de cada uno de los procesos unitarios que formen parte del sistema analizado. En definitiva se trata de realizar un balance de los flujos elementales que entran y salen del sistema a lo largo de toda su vida útil para la unidad funcional seleccionada. Los flujos elementales son los flujos energéticos y de materiales que provienen de la naturaleza (como por ejemplo, el petróleo, el carbón, el agua bruta, la arena natural, etc.) sin ninguna transformación previa realizada por el ser humano, o que van directamente a la naturaleza (como por ejemplo, las emisiones al aire de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, los vertidos de nitratos al agua, etc.)

Para cada proceso unitario, las entradas cuantificadas incluyen el uso de energía y materias primas, mientras que las salidas cuantificadas incluyen las emisiones al aire, agua y suelo, subproductos y otros vertidos, tal como muestra la siguiente figura.

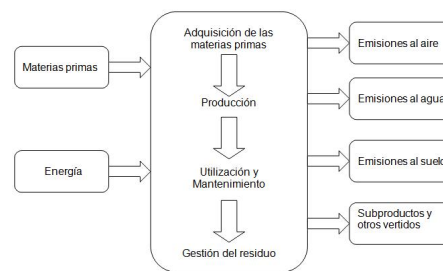


Figura 2.4. Inventario del ciclo de vida aplicado a un proceso unitario del sistema

En caso de que existan procesos que den lugar más de un producto, o los residuos del producto sean reciclados o reutilizados para crear un nuevo producto, se deben aplicar criterios de asignación de la carga medioambiental que permitan un adecuado reparto de los impactos entre los distintos productos.

En el inventario de ciclo de vida pueden utilizarse datos propios, ya sean medidos, calculados o estimados, junto con otros datos procedentes de bases de datos ya existentes o bien de Declaraciones Ambientales de Productos suministradas por los propios fabricantes y verificadas por una entidad externa. En el apartado 2.5 se describen detalladamente las bases de datos más comunes y las DAP disponibles en la actualidad.

### 2.4.3. Evaluación de impactos

En esta fase se seleccionan un conjunto de indicadores medioambientales, denominados categorías de impacto (como por ejemplo, el cambio climático) y se utilizan indicadores numéricos de categoría (como por ejemplo, los kg de CO<sub>2</sub> equivalentes según el modelo del IPPC) para agrupar y evaluar los impactos del inventario de ciclo de vida.



La evaluación de impactos incluye obligatoriamente las siguientes etapas:

- **Clasificación:** Asignación de los datos del inventario a las categorías de impacto previamente seleccionadas.
- **Caracterización:** Cálculo de los indicadores numéricos de categoría para cada categoría de impacto.

Opcionalmente los resultados numéricos de la caracterización pueden además normalizarse, agruparse y ponderarse en las siguientes etapas:

- **Normalización:** Cálculo de la magnitud de los resultados de los indicadores de categoría con relación a las magnitudes reales o previstas a escala nacional, continental o global para dichos indicadores.
- **Valoración o ponderación:** Cálculo subjetivo de resultados ponderados para cada categoría de impacto y posible agregación de los mismos.

#### **2.4.3.1. Clasificación**

En esta etapa se seleccionan las categorías de impacto a evaluar, y se asignan los resultados del inventario de ciclo de vida a las categorías seleccionadas. Las categorías de impacto se pueden definir como los impactos sobre el medioambiente causados por los flujos energéticos y materiales del inventario de ciclo de vida. Como se expondrá en el apartado 2.6, cada método de evaluación considera unas determinadas categorías de impacto, por lo que al optar por un método determinado se están seleccionando indirectamente las categorías de impacto a considerar en el estudio.

Tras la clasificación se dispone de un inventario agrupado y simplificado donde sólo aparecen los flujos energéticos y materiales que afectan a las categorías de impacto seleccionadas.

#### **2.4.3.2. Caracterización**

En esta fase se realiza la conversión de los resultados del inventario de ciclo de vida clasificado a unidades comunes utilizando los denominados factores de caracterización y se agregan los resultados convertidos, obteniendo como resultado un indicador numérico para cada categoría de impacto.

Los factores de caracterización representan, por tanto, la contribución relativa de una sustancia a una categoría de impacto. Cada metodología de evaluación de impactos aplica distintos factores de caracterización a las sustancias incluidas en cada categoría de impacto.

En definitiva, en la fase de caracterización se multiplican los resultados del inventario obtenido en la fase de clasificación por los factores de caracterización de cada sustancia incluida dentro de cada categoría de impacto.

Tras la caracterización se dispone de un inventario agrupado por categorías de impacto, evaluadas cada una de ellas mediante un indicador numérico.

### **2.4.3.3.Normalización**

La normalización es una etapa opcional de la fase de evaluación de impactos, que muestra el grado de contribución de cada categoría de impacto considerada sobre el problema medioambiental global. Por tanto, el objetivo de esta etapa es comprender mejor la magnitud relativa de los indicadores numéricos obtenidos en la caracterización.

En definitiva, en la fase de normalización se dividen los resultados de la caracterización por los factores de normalización de cada categoría de impacto. Los factores de normalización constituyen la magnitud real o predicha de la categoría de impacto correspondiente para un área geográfica y un momento en el tiempo determinado. Usualmente cada método de evaluación de impactos aplica distintos factores de normalización a las categorías de impacto consideradas en dicho método.

### **2.4.3.4.Ponderación**

La ponderación es una etapa opcional de la fase de evaluación de impactos, donde se convierten los resultados de los indicadores normalizados de las diferentes categorías de impacto, utilizando factores numéricos (factores de ponderación) basados en valoraciones subjetivas. Además esta etapa suele incluir la agregación de los resultados de los indicadores ponderados.

Por tanto, básicamente la ponderación consiste en multiplicar los factores de ponderación por el resultado de la normalización para cada categoría de impacto y sumarlos posteriormente para obtener una puntuación total medioambiental del sistema analizado.

Los factores de valoración de cada categoría de impacto representan la importancia relativa de cada categoría de impacto sobre el medioambiente. Estos factores son totalmente subjetivos y pueden variar según el área geográfica en función de diversos criterios socioeconómicos. Por ejemplo, la categoría de impacto “consumo de recursos hídricos” puede tener una gran importancia en países con déficit hídrico, mientras que en aquellos países con excedentes hídricos su importancia relativa será menor.

Evidentemente cada método de evaluación de impactos considera unos factores de ponderación determinados para cada categoría de impacto.

### **2.4.4.Interpretación de resultados**

La interpretación es la fase en la que se combinan los resultados de las fases anteriores del ACV para obtener una serie de conclusiones y recomendaciones útiles para la toma de decisiones sobre el sistema analizado, de forma consistente con el objetivo y alcance del estudio.

Los objetivos de la interpretación son analizar los resultados, establecer las conclusiones, explicar las limitaciones y emitir recomendaciones basadas en los resultados de las fases anteriores e informar acerca de los resultados de forma transparente.

En la interpretación se engloban 3 elementos fundamentales:

- **Identificación de las variables significativas:** Consiste en determinar qué procesos conllevan un mayor impacto y cuáles se podrían obviar.
- **Verificación de los resultados:** Se pretende establecer y reforzar la confianza y fiabilidad de los resultados del estudio mediante análisis de integridad, de sensibilidad y de consistencia. El análisis de integridad pretende asegurar que toda la información relevante y los datos necesarios para la interpretación están disponibles y completos. En el análisis de sensibilidad se evalúa la fiabilidad de los resultados finales y de las conclusiones determinando si se ven afectados por incertidumbres en los datos o en los métodos de evaluación seleccionados. Por su parte, en el análisis de consistencia se valora si las hipótesis, métodos y datos son coherentes con el objetivo y alcance del estudio.
- **Conclusiones y recomendaciones:** El establecimiento de conclusiones debe hacerse de forma interactiva considerando todas las fases del ACV. Las recomendaciones deberán basarse en las conclusiones finales del estudio.

#### 2.4.5. Tipologías de ACV

En general, los estudios de ACV pueden clasificarse en función de la variación en el tiempo de los procesos analizados como ACV estáticos y ACV dinámicos (Pehnt M., 2006). Asimismo en función de la relación entre los resultados obtenidos, las correspondientes decisiones tomadas y sus efectos, el ACV puede tener un enfoque atributivo convencional o un enfoque sobre las consecuencias (Sandén B.A., Karlström M., 2007).

En un ACV estático, los inventarios del ciclo de vida incluyen valores medios de los procesos actuales dentro del sistema analizado. No obstante, en la realidad, las características de algunos elementos son variables en el tiempo. Por ejemplo, el rendimiento de las calderas y de los materiales aislantes disminuye con el tiempo. Del mismo modo, las emisiones asociadas a la movilidad de los ocupantes de los edificios tienden a disminuir en el tiempo debido a las mejoras tecnológicas de los vehículos de transporte, al mismo tiempo que aumentan en el tiempo los hábitos de movilidad condicionados por una progresiva tendencia a crear zonas comerciales y residenciales en las periferias de las ciudades alejadas de los centros de trabajo siguiendo un modelo urbanístico disperso. Por todo ello, y debido a la larga vida útil prevista para un edificio podría considerarse la realización de estudios de ACV dinámicos, que tienen en cuenta la variación de los valores medios de los procesos del sistema analizado en los inventarios del ciclo de vida.

Mediante un sencillo ejemplo, se puede ver la influencia de la tipología de ACV seleccionada en los resultados obtenidos. Por ejemplo, en un ACV estático, el rendimiento de una caldera de gas instalada en un edificio se mantendría constante en el 95%, que corresponde al rendimiento medio actual de las calderas de gas natural. Sin embargo, en un ACV dinámico se podría suponer que el rendimiento se mantendría estable sólo durante la mitad de la vida útil de la caldera reduciéndose posteriormente hasta llegar a un 60% antes de su sustitución. A partir de ahí aumentaría nuevamente el rendimiento al valor inicial del 95% (o incluso a un valor mayor). Si se supone una vida útil de 80 años para el edificio, y de 20 años

para la caldera, la caldera sería reemplazada 3 veces a lo largo de la vida del edificio.

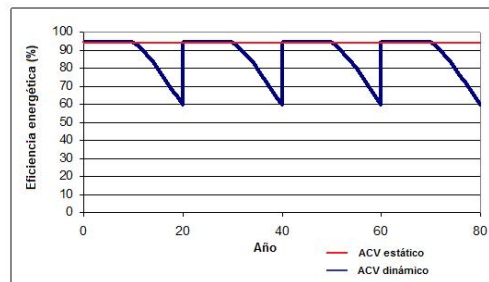


Figura 2.5. Eficiencia de una caldera a lo largo de una vida útil del edificio de 80 años según los enfoques estático y dinámico. Fuente: (Peuportier B., et al., 2010).

Los resultados del ACV dinámico son sin duda más precisos que los del ACV estático, si bien conllevan una mayor complejidad, aumentando los requisitos de calidad de los datos. Por ello, una simplificación aceptable sería considerar un rendimiento de la caldera constante (por ejemplo, del 85% en vez del 95% de una caldera nueva) que tenga en cuenta un escenario de deterioro típico (Peuportier B., et al., 2010).

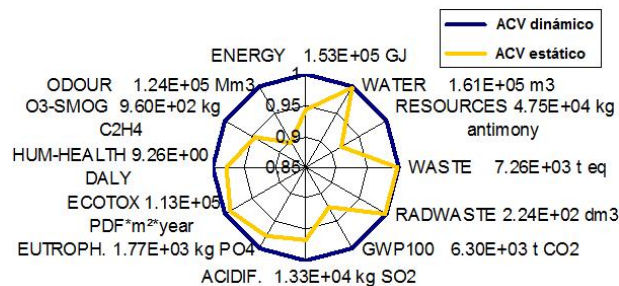


Figura 2.6. Resultados del ACV de un edificio considerando la eficiencia de la caldera constante (ACV estático) o variable (ACV dinámico). Fuente: (Peuportier B., et al., 2010).

Un ACV atributivo tiene por objeto describir los impactos medioambientales del sistema analizado a lo largo del ciclo de vida, mientras que el objetivo de un ACV enfocado a las consecuencias es describir los efectos de los cambios en el ciclo de vida del sistema analizado, propiciados por el resultado de estudios previos de ACV. Si, por ejemplo, a partir de los resultados de estudios de ACV atributivos, se desprende que las bombas de calor son una alternativa recomendable, y se modifica la normativa con objeto de inducir una fuerte penetración de las bombas de calor en el mercado, se estará induciendo también un incremento del pico de demanda de electricidad en invierno. Si para cubrir esa mayor demanda se construyen nuevas plantas termoeléctricas que se añaden a un mix eléctrico preexistente con bajas emisiones de carbono, la consecuencia final serán unas mayores emisiones de CO<sub>2</sub> que las evaluadas originalmente en los estudios de ACV con enfoque atributivo. Por ello, un ACV enfocado sobre las consecuencias puede resultar más adecuado en determinados casos (Peuportier B., et al., 2010).

Todos los estudios de ACV realizados en los próximos capítulos de esta tesis tienen un enfoque estático y atributivo, que es el más utilizado, y por tanto permite una mejor comparación de los resultados obtenidos. Además, los resultados de los

ACV dinámicos y enfocados en las consecuencias son menos fiables, debido a las hipótesis y escenarios a medio-largo que se requiere incluir en este tipo de estudios.

## 2.5. Datos de inventario del ciclo de vida

En un estudio de ACV se pueden utilizar datos procedentes de una única base de datos o combinar información de diversas bases de datos, en función de los requisitos de calidad de datos (ámbito temporal, geográfico, etc.) que se hayan definido para el estudio. Hay que hacer notar que dependiendo del producto analizado, datos con una antigüedad determinada o procedentes de una zona geográfica concreta pueden ser o no válidos.

Todas las aplicaciones informáticas utilizadas para realizar estudios de ACV incorporan una o varias bases de datos que se utilizan para obtener el inventario de ciclo de vida. Además la mayor parte de aplicaciones permiten editar las bases de datos incluidas y crear nuevas.

En general, lo recomendable es que el inventario de ciclo de vida incluya, en la medida de lo posible, datos personalizados para el producto analizado. Esto puede hacerse a partir de diversas mediciones, cálculos o estimaciones propias, que pueden complementarse con las declaraciones ambientales de productos similares (siempre que estén disponibles) y con los inventarios de las bases de datos ya existentes.

En la actualidad, el “*Life Cycle Inventory Programme*”, que forma parte de la “*Life Cycle Initiative*” (accesible a través de la página web: <[www.estis.net/sites/lcinit/](http://www.estis.net/sites/lcinit/)>) de la UNEP y la SETAC, pretende poner en marcha mecanismos que estimulen la mejora continua de la accesibilidad, transparencia y calidad de las bases de datos de inventarios de ciclo de vida.

### 2.5.1. Bases de Datos

La siguiente tabla muestra las principales bases de datos que se pueden utilizar en los estudios de ACV.

Base de datos (año)	Contenido	Entidad desarrolladora	Nº de procesos
ELCD core database v.II (2009)	Materiales, transformación de energía, transporte y gestión de residuos	Diversas entidades, asociaciones y organizaciones europeas < <a href="http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasetCategories.vm">http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasetCategories.vm</a> >	316
U.S. Life-Cycle Inventory database v.1.6.0 (2008)	Flujos de energía y materiales para los procesos unitarios más comunes	National Renewable Energy Laboratory (Estados Unidos) < <a href="http://www.nrel.gov/lci/database">www.nrel.gov/lci/database</a> >	355
US IO database (2003)	Datos Input-Output para Estados Unidos	CML, University of Leiden (Países Bajos) < <a href="http://www.leidenuniv.nl/interfac/cml">www.leidenuniv.nl/interfac/cml</a> >	481
Danish IO database (1999)	Datos Input-Output para Dinamarca	2.0 LCA Consultants (Dinamarca) < <a href="http://www.lca-net.com">www.lca-net.com</a> >	793
LCA Food DK (2003)	Datos de alimentación		671

Base de datos (año)	Contenido	Entidad desarrolladora	Nº de procesos
Ecoinvent v1.2 (2005)	Gran variedad de procesos incluyendo energía, transporte, materiales de construcción, productos químicos, agricultura, gestión de residuos, etc. de Suiza y Alemania	Ecoinvent centre (Suiza) <www.ecoinvent.ch>	2.700
Ecoinvent v2.0 (2007)			4.000
IVAM LCA Data v.4.06 (2004)	Datos holandeses sobre materiales, transporte, energía y tratamiento de residuos	IVAM Environmental Research (Holanda) <www.ivam.uva.nl/index.php?id=164&L=1>	1.350
Boustead Model v.5.0.12 (2006)	Amplia base de datos de materiales, producción de combustibles y energía	Boustead Consulting Limited (Reino Unido) <www.boustead-consulting.co.uk>	-
Athena database v.4 (2009)	Consumos energéticos y emisiones de productos de la construcción a lo largo de su vida útil	Athena Institute (Canadá) <www.athenasmi.org/tools/database/index.html>	1.200
Industry data (2001)	Diversos datos publicados por asociaciones industriales	Varios asociaciones internacionales, como la asociación PlasticsEurope <www.plasticseurope.org>	74
Idemat (2001)	Base de datos holandesa, compilada a partir de distintas fuentes	Delft Technical University (Países Bajos) <www.io.tudelft.nl>	508
Buwal 250 (1997)	Materiales generales, energía, transporte, residuos, etc	Swiss Institute of Packaging (Suiza) <www.umwelt-schweiz.ch/buwal/eng/index>	248
ETH-ESU (1996)	Amplia base de datos suiza centrada en energía, transporte y residuos	ETH-ESU (Suiza) <www.uns.ethz.ch>	1.200
GEMIS 4.5 (2009)	Base de datos gratuita que engloba procesos energéticos y de transporte, materiales, procesos de reciclaje y de tratamiento de residuos	Öko-Institut (Alemania) <www.gemis.de>	-
Franklin (1996)	Base de datos estadounidense sobre energía, transporte y materiales generales	Franklin Associates Ltd (EEUU) <www.fal.com>	78
Banco Bedec (2009)	Coste energético y emisión de CO <sub>2</sub> de elementos de edificación, urbanización, ingeniería civil, etc	ITEC (España) <www.itec.es/nouBedec.e/presentacionobedec.aspx>	-
LCA_sostenipra v.1.0 (2007)	Producción de biomasa, uso de madera, reciclaje, arquitectura sostenible	SosteniPrA - Universitat Autònoma de Barcelona (España) <www.sostenipra.cat>	-

Tabla 2.3. Bases de datos para estudios de ACV

La Comisión Europea está promoviendo a través de la Plataforma Europea de ACV, el desarrollo de una base de datos europea “*European Reference Life Cycle Database*” (*ELCD*) con criterios de calidad, consistencia y aplicabilidad, que incluye datos suministrados o aprobados por el sector industrial sobre materiales y procesos básicos como el transporte, la transformación energética y la gestión de residuos. La versión II de esta base de datos de libre acceso contiene más de 300 inventarios de procesos y está disponible on-line en la siguiente página web: <<http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcaifohub/datasetCategories.vm>>. Asimismo, dentro de las actividades de esta Plataforma se encuentra la creación de un sistema internacional de datos de referencia de ciclo de vida “*International Reference Life Cycle Data System*” (*ILCD*). El *ILCD* tiene por objeto proporcionar un enfoque coherente para asegurar la calidad de los inventarios de ciclo de vida y las metodologías a utilizar como base en las herramientas de ACV. El *ILCD* se compone principalmente de un Manual y una Red de Datos. El Manual (Comisión Europea-JRC-Institute for Environment and Sustainability, 2009) consta de una serie de documentos técnicos elaborados de acuerdo con la normativa ISO 14040.

La Red de Datos está basada en un sistema web descentralizado, capaz de proporcionar datos de inventario de ciclo de vida de calidad garantizada, cumpliendo con los requisitos del Manual. La Red tiene carácter abierto para todos los proveedores de datos que quieran incorporarse.

El *U.S. Life-Cycle Inventory* contiene módulos de datos de libre acceso on-line para cuantificar los flujos de energía y materiales que entran o salen del medio ambiente para los procesos unitarios más comunes. El centro de investigación *NREL's High-Performance Buildings* y el Instituto *Athena* están trabajando estrechamente con el gobierno y varios socios industriales en el desarrollo y mantenimiento de la base de datos. El protocolo de datos se basa en la norma ISO/TS 14048:2002 y es compatible con el formato *EcoSpold* (Frischknecht R., Rebitzer G., 2005), formato común para el intercambio de datos de inventario de ciclo de vida. Según establece dicho protocolo, los datos han sido revisados críticamente.

La base de datos *Input-Output* de Estados Unidos se centra en 481 sectores de la economía de este país. La base de datos consta de una matriz de productos básicos del año 1998, complementada con otros bienes de capital. Los datos medioambientales han sido recopilados a partir de diversas fuentes de datos tales como: *Toxic Releases Inventory 98*, *Air Quality Planning and Standard*, *US EPA*, *US DOE*, *Bureau of Economic Analysis*, *Department of Commerce*, *National Center for Food and Agricultural Policy* y *World Resource Institute*.

La base de datos danesa *Input-Output* se basa en un conjunto de datos estadísticos (NAMEA) del año 1999 para Dinamarca. Con objeto de poder ser utilizados en estudios de ACV, dichos datos fueron modificados y mejorados (Weidema B.P., et al., 2005). Por otra parte, la base de datos LCA Food DK proporciona datos medioambientales de productos alimenticios de Dinamarca en toda la cadena alimentaria. Ambas bases de datos han sido desarrolladas por *2.0 LCA Consultants*.

*ECOINVENT* es una base de datos desarrollada por el centro suizo del mismo nombre, creada a partir de una iniciativa conjunta del Instituto suizo de investigación ETH y diversas Oficinas Federales de Suiza (*PSI*, *EPFL*, *EMPA*, *ART* y *PSI*). En su versión 2.0 de 2007 se incluyen 4.000 procesos unitarios y 4.000 procesos de sistema con una amplia documentación justificativa. Los inventarios engloban datos internacionales sobre el suministro de energía, extracción de recursos, distintos tipos de materiales, productos químicos, metales, procesos agrícolas, servicios de gestión de residuos y servicios de transporte.

Los inventarios han sido recogidos, armonizados, y completados en el marco del proyecto *Ecoinvent 2000*, dando lugar a la base de datos europea más completa y de más calidad, incorporada en la mayoría de las herramientas de ACV. Si bien, los datos proceden principalmente de la industria suiza y alemana, son aplicables (con ciertas limitaciones) al resto de Europa.

Aunque otras bases de datos (como *IVAM*, *ETH-ESU* o *IDEMAT*) incluyen algunos inventarios de materiales constructivos, la versión 2.0 de *ECOINVENT* contiene la información más amplia, detallada y actualizada sobre estos materiales. En concreto, contiene datos de inventarios de 11 materiales aglutinantes (mortero adhesivo, de cemento, ligero, cementos Portland, etc.), 6 tipos de ladrillo (común, de arcilla aligerada, refractario, silico-calcáreo, etc.), 12 tipos de hormigón (normal, ligero con arcilla, poliestireno, perlita o vermiculita expandida, especial para forjados, etc.), 16 tipos de revestimientos (baldosas y tejas cerámicas, tejas de hormigón, paneles de yeso, etc.), 4 tipos de puertas, 4 tipos de marcos de ventana

(aluminio, PVC, madera, madera-aluminio), 5 tipos de vidrio (simple, doble, triple, etc.), 13 materiales aislantes tanto naturales como artificiales (fibra de celulosa, corcho, lana de vidrio, poliestireno, etc.), 3 tipos de pinturas, 7 materiales bituminosos, diversos tipos de áridos (arena, grava, gravilla, etc.), metales (acero, aluminio, cobre, etc.), materiales plásticos (polietileno, PVC, poliuretano, etc.), maderas (laminada, tablero de partículas, OSB, etc.), captadores solares térmicos y paneles fotovoltaicos de distintas tecnologías.

La base de datos *IVAM LCA Data* está orientada a materiales, transporte, energía y tratamiento de residuos recopilados por el *IVAM Environmental Research*. La versión de 2004 contiene un total de 1.350 procesos, incluyendo más de 350 materiales. En lo que respecta a materiales de construcción se incluyen 21 materiales aglutinantes, 4 materiales bituminosos y revestimientos, 5 tipos de ladrillo, 8 tipos de hormigón, 6 materiales aislantes, 12 clases de pintura, y diversos tipos de metales, plásticos y maderas. En comparación con *ECOINVENT*, la base de datos IVAM es menos completa, no incluyendo información justificativa detallada acerca de las fuentes utilizadas y las hipótesis realizadas en la elaboración de los inventarios.

La base de datos *BOUSTEAD* engloba cerca de 13.000 operaciones unitarias, que abarcan una gran cantidad de procesos industriales de fabricación de materiales, producción de combustibles y energía para casi todos los países del mundo.

La base de datos canadiense *ATHENA* contiene inventarios de productos de la construcción, que incluye consumos energéticos y emisiones al aire asociadas a la construcción in-situ, mantenimiento, reparación y sustitución de elementos de un edificio a lo largo de su vida útil, así como su demolición y disposición final. A partir de los inventarios es posible modelar más de 1.200 soluciones constructivas diferentes para edificios.

La base de datos *INDUSTRY DATA* contiene datos recogidos y publicados por diversas asociaciones de industrias de carácter internacional. En la versión de 2001, se engloban 74 tipos de procesos. Mayoritariamente se trata de datos “desde la cuna hasta la puerta”.

*IDEMAT 2001* es una base de datos que se centra en la producción de diversos materiales utilizados en ingeniería (metales, aleaciones, plásticos, madera), energía y transporte. Fue desarrollada por la *Delft University of Technology* de Holanda compilando diversas fuentes de datos. Engloba un total de 508 tipos de procesos en la versión de 2001.

*BUWAL 250* es una base de datos desarrollada por el Instituto Suizo de Embalaje y basada parcialmente en la base de datos *ETH-ESU*. Incluye inventarios relativos a la producción de energía, transporte, residuos, y diversos procesos de producción de materiales, incluyendo materiales de embalaje como plásticos, cartón, papel, etc. La versión de 1997 engloba un total de 248 tipos de procesos.

La base de datos *ETH-ESU*, elaborada por el Instituto de Investigación *ETH-ESU* de Zurich (Suiza), se centra en energía, transporte y tratamiento de residuos. En ella se abarca la producción e importación de combustibles, la generación y distribución de electricidad. En la versión completa de esta base de datos se incluye información relativa a un total de 1.200 tipos de procesos, aplicables principalmente a países del Oeste de Europa.



La base de datos *GEMIS* engloba numerosos procesos energéticos (energía fósil, nuclear, renovables, etc.) y de transporte (de personas y mercancías), materiales (metales, minerales, alimentos, plásticos, etc.) así como procesos de reciclaje y de tratamiento de residuos. Los procesos energéticos están desglosados para todos los países de la UE-27, y otros países como Rusia, EE.UU., etc. Los procesos relacionados con los materiales se basan en datos de la UE, diferenciados regionalmente en cuanto a la extracción y el procesamiento. Los procesos de transporte se basan en datos de la UE y EE.UU., incluyendo procesos específicos para países en desarrollo. En la actualidad, *GEMIS* dispone cerca de 10.000 procesos, y alrededor de 1.000 productos.

*FRANKLIN* es una base de datos norteamericana que incluye inventarios de energía, transporte y materiales de uso general como acero y plástico recopilados por *Franklin Associates Ltd.* (USA). Los datos están basados en diversas fuentes públicas y privadas de Estados Unidos, estadísticas, informes y conversaciones telefónicas con expertos. En la versión de 1996 se incluyen un total de 78 tipos de procesos.

El Banco *BEDEC* es una base de datos de libre acceso on-line elaborada por el Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña (ITEC). Contiene 375.000 elementos de edificación, urbanización, ingeniería civil, rehabilitación y restauración, seguridad y salud, ensayos de control y gastos indirectos, con precios de referencia para todas las provincias y Comunidades Autónomas de España, 5.000 pliegos de condiciones técnicas, la integración de los productos comerciales de 80 empresas y datos medioambientales, que incluyen residuos de obra y de embalaje, coste energético y emisión de CO<sub>2</sub>.

La base de datos *LCA\_SOSTENIPRA* recopila datos de varios procesos productivos relacionados con la producción de biomasa (cultivos energéticos y biomasa forestal), el uso de la madera, el reciclaje (de la energía y los productos), el ecodiseño, la arquitectura sostenible y la química verde.

En la actualidad, a excepción de los 2 últimas bases de datos mencionadas (*BEDEC* y *LCA\_SOSTENIPRA*), no existe ninguna base de datos específica para el sector de la construcción en España, por lo que la mayor parte de las veces, se suelen utilizar bases de datos de países centroeuropeos, con el error que ello conlleva, debido a las diferencias en los procesos productivos, las tecnologías, las materias primas y su transporte, las fuentes energéticas utilizadas y la disposición final de los residuos.

### **2.5.2. Ecoetiquetas y Declaraciones Ambientales de Producto**

El ecoetiquetado de productos es un mecanismo de carácter voluntario que permite diferenciar mediante el uso de un distintivo, aquellos productos que han sido fabricados de forma sostenible con un menor impacto sobre el medioambiente. Las ecoetiquetas o etiquetas ecológicas proporcionan al consumidor información sobre las repercusiones medioambientales de los productos y constituyen un método estandarizado para comparar productos. De esta manera, en un producto ecoetiquetado se puede reconocer el cumplimiento de las especificaciones ambientales exigidas por un organismo otorgador. A través de los programas de ecoetiquetado, las empresas que desarrollan productos medioambientalmente sostenibles, adquieren una ventaja competitiva usando el sello como un mecanismo para mantener y atraer a más clientes (Aranda A., et al., 2006).

La norma internacional ISO 14020 establece las directrices para el desarrollo y uso de las etiquetas y declaraciones medioambientales. La ISO 14020 establece en la actualidad tres tipos de ecoetiquetas ambientales: tipo I, tipo II y tipo III.

La ecoetiqueta tipo I indica un mejor comportamiento medioambiental del producto para unas determinadas características funcionales. Este tipo de ecoetiqueta, según establece la norma ISO 14024, debe ser certificada por una entidad externa, pero no requiere necesariamente la realización de un ACV del producto. En el ámbito europeo, las ecoetiquetas tipo I más destacadas son: AENOR Medio Ambiente, la Etiqueta Ecológica de la Unión Europea, el Ángel Azul del Ministerio Federal de Medio Ambiente de Alemania, el Cisne Blanco de los países nórdicos, etc.

La ecoetiqueta tipo II consiste en una autodeclaración ambiental del producto por parte del fabricante según la norma ISO 14021, por lo que, en este caso, no requiere (aunque podría) ser certificada por una entidad externa, ni conlleva la realización de un estudio de ACV. Un ejemplo típico de ecoetiqueta tipo II es el bucle de Möbius que indica que un producto es reciclable o contiene material reciclado.

La ecoetiqueta tipo III consiste en una Declaración Ambiental de producto (DAP o *EPD-Environmental Product Declaration*) con verificación externa donde se comunican los resultados del ACV del producto. El desarrollo de DAPs se ha convertido en un importante campo de aplicación del ACV. La declaración ofrece generalmente el resultado del ACV según distintos indicadores de categoría de impacto.

Los estándares UNE-ISO 14025:2007, ISO 21930:2007 y prEN 15804:2008 normalizan este tipo de ecoetiqueta. Tal como muestra la Tabla 2.4, existen diferentes sistemas de ecoetiquetado tipo III a nivel mundial. En España se ha creado recientemente el sistema DAPc.

Sistema	Entidad y país	
Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDEs)	AIMCC, Francia	<www.inies.fr>
Umwelt-Deklarationen (EPD)	IBU, Alemania	<www.bau-umwelt.com>
Environmental Product Declaration	The Swedish Environmental Management Council, Suecia	<www.environdec.com>
Environmental Profiles of Construction Products	BRE, Reino Unido	<www.bre.co.uk>
Milieu Relevante Product Informatie	NVTB, Holanda	<www.mrpi.nl>
RT Environmental Declaration	RT Finlandia	<www.rts.fi>
Norwegian Environmental Product Declaration	NHO Noruega	<www.epd-norge.no>
Déclaration sur les caractéristiques écologiques de produits utilisés dans la construction	SIA, Suiza	<www.sia.ch>
EcoLeaf Product Environmental Aspects Declaration	JEMAI, Japón	<www.jemai.or.jp>
Environmental Declaration of Products Korea	EcoProducts Institute, Corea	<www.koeco.or.kr>

Tabla 2.4. Declaraciones ambientales de producto a nivel mundial

La norma ISO 14025 proporciona las orientaciones generales para el desarrollo de DAPs y describe un procedimiento para establecer reglas de categoría de producto (*RCP* o *PCR – Product Category Rules*) que garantizan que las DAPs obtenidas

para una determinada categoría de productos son comparables entre sí. Por tanto, las RCP fijan, para cada categoría de productos, las normas y requisitos a considerar a la hora de realizar el ACV, como por ejemplo, el listado de sustancias químicas a declarar, el objetivo y alcance del ACV para la categoría de producto considerada, etc.

En la actualidad existen un buen número de DAPs y RCPs disponibles a través de la página web de la Red Global de Declaraciones Ambientales de Producto de Tipo III (GEDnet): <[www.gednet.org](http://www.gednet.org)>, en la que participan representantes de Australia, China, Dinamarca, Alemania, Japón, Corea del Sur, Suecia y Taiwán; y también a través del sistema internacional *EPD*<sup>®</sup> creado originariamente en Suecia (SEMC, 2000). En este momento, el sistema *EPD*<sup>®</sup> cuenta con un total de 104 declaraciones medioambientales de productos de fabricantes de los siguientes países: Italia, Japón, Países Bajos, Polonia, Suecia, Suiza y España; de los que 33 están aún en proceso de verificación. Entre los productos incluidos en el sistema *EPD*<sup>®</sup> hay algunos materiales de construcción como los ladrillos, ventanas, tejas cerámicas y de hormigón, tableros de partículas, cemento, etc. Todas las DAPs del sistema *EPD*<sup>®</sup> pueden consultarse a través de la página web: <[www.environdec.com](http://www.environdec.com)>.

En Noruega se está elaborando la base de datos “*EcoProduct*” en base a las DAPs actualmente disponibles. Para promover el desarrollo de DAPs, la entidad noruega *EPD-Norge* está recopilando datos del mix eléctrico nacional, del transporte y el embalaje aplicables al sector noruego de la construcción, a la vez que está desarrollando reglas de categoría de producto para materiales de la construcción. De este modo se espera disponer próximamente de una base de datos noruega de materiales de la construcción: “*Norsk Byggjeneste*”.

Por otra parte, la Declaración Ambiental *RT* finlandesa (Häkkinen T., et al., 2006) está basada en una metodología nacional que sigue los principios de la normativa ISO, desarrollada mediante la colaboración de la Confederación Finlandesa de Industrias de la Construcción *RT*, la Fundación *Building Information*, el centro de investigación *VTT* y las empresas del sector de la construcción. La Declaración Ambiental *RT* es un documento de carácter voluntario y público que proporciona información comparable e imparcial sobre los impactos medioambientales de los materiales de construcción a usuarios, diseñadores y constructores.

En Reino Unido existe cada vez una mayor demanda de disponer de una información medioambiental fiable e independiente de los materiales de construcción. En este sentido, los perfiles ambientales promovidos por la entidad inglesa *BRE* proporcionan dicha información de manera estandarizada, identificando y evaluando los impactos medioambientales de los materiales de construcción durante su ciclo de vida.

Como conclusión, cabe decir que las Declaraciones Medioambientales de Producto permiten disponer de información más precisa de los impactos de un producto determinado que la obtenida a partir de las bases de datos descritas en el apartado 2.5.1. No obstante, a día de hoy y debido a su carácter voluntario, sólo existen para un reducido número de productos, por lo que en esta tesis, los estudios de ACV se realizarán utilizando datos de inventario adaptados, procedentes de bases de datos como *Ecoinvent*, *IVAM* e *IDEMAT*.

## 2.6. Indicadores medioambientales y metodologías de evaluación de impacto

En este apartado se presentan los principales indicadores medioambientales que forman parte de las metodologías de evaluación de impacto utilizadas en los estudios de ACV, haciendo un mayor énfasis en aquellas metodologías que se van a utilizar en los próximos capítulos de esta tesis para evaluar los impactos de diversos materiales constructivos y de distintas tipologías de edificios: Demanda de Energía Acumulada (CED), Potencial de Calentamiento Global (GWP), Huella Hídrica y Ecoindicador 99.

Los principales indicadores medioambientales utilizados en estudios de ACV aplicados a edificios (Peuportier B., et al., 2009) se muestran en la tabla siguiente.

1. Recursos	1.1. Agotamiento de recursos bióticos, CML 1992
	1.2. Agotamiento de recursos abióticos, CML 1995 y 2001
	1.3. Demanda de energía acumulada a) total y b) fracción no renovable
	1.4. Agotamiento de recursos hídricos
	1.5. Energía adicional para extraer minerales y combustibles fósiles
	1.6. Uso del terreno
	1.7. Factor de uso de recursos
	1.8. Demanda de exergía acumulada
2. Contaminación del aire	2.1. Potencial de calentamiento global, IPCC 1994 y 2001
	2.2. Potencial de disminución de la capa de ozono, CML 1992, 1995 y 2001
	2.3. Acidificación potencial, CML 1992, 1995 y 2001
	2.4. Niebla de invierno, CML 1992 y 1995
	2.5. Formación de oxidantes fotoquímicos (niebla de verano), CML 1992, 1995 y 2001
	2.6. Olor, CML 1992 and 2001
3. Contaminación del agua	3.1. Eutrofización potencial, CML 1992, 1995 y 2001
	3.2. Ecotoxicidad acuática, CML 1992 y 2001
4. Contaminación del suelo y residuos	4.1. Ecotoxicidad terrestre, CML 1992 y 2001
	4.2. Cantidad de residuos sólidos
	4.3. Cantidad de residuos radiactivos
5. Daños, salud y biodiversidad	5.1. Toxicidad humana, CML 1992 y 2001
	5.2. Metales pesados, CML 1995
	5.3. Sustancias cancerígenas, CML 1995
	5.4. Pérdida de años de vida ajustados en función de la discapacidad (DALY), Ecoindicador 99
	5.5. Radiación ionizante, CML 2001
	5.6. Agotamiento de recursos bióticos, CML 1992 y 2001
	5.7. Impacto del uso del terreno, CML 2001
	5.8. Fracción potencialmente desaparecida (PDF), Ecoindicador 99

Tabla 2.5. Indicadores medioambientales utilizados en edificios

Con respecto a los indicadores basados en los recursos, en el “agotamiento de recursos abióticos” se utilizan datos relativos a las materias primas o las reservas de combustible, sobre los que existe una gran incertidumbre. Por ejemplo, en el método CML de 2001, dicho indicador considera unas reservas de uranio de 62.500 billones de toneladas (últimas reservas), que difiere en varios órdenes de magnitud a las reservas consideradas en otras fuentes. Por ejemplo, en el método CML de 1992 se consideran unas reservas de 1,7 millones de toneladas de uranio, la *US Bureau of Mines*, 13,4 millones de toneladas, y el *French Energy Observatory*, 4,7 millones de toneladas. Además la consideración de las últimas reservas es problemática, especialmente en el caso de las reservas energéticas, ya que al

disminuir la calidad del combustible, su explotación puede no ser rentable al necesitar más energía para extraer el combustible que la que puede ser obtenida a partir del mismo. Como consecuencia de lo anterior, el consumo de 1 kWh de electricidad de origen nuclear contribuye aproximadamente 100 veces menos al agotamiento de los recursos que el consumo de 1 kWh de electricidad producida en una central de gas, aun considerando una tasa de extracción similar.

El indicador de “demanda de energía acumulada” incluye la energía de origen renovable. No obstante debe hacerse una distinción entre los distintos tipos de energías renovables. Por ejemplo, si un edificio se calienta con biomasa o calor de origen geotérmico, dicha energía consumida no está ya disponible para otros edificios. Sin embargo, la instalación de captadores solares térmicos o paneles fotovoltaicos en el edificio no reduce la energía disponible en otros edificios.

La evaluación del “agotamiento de los recursos hídricos” exige definir cuestiones cómo qué tipo de agua se contabiliza (agua potable, agua de ríos, aguas subterráneas, etc.) o si sólo se contabiliza el consumo de agua neto (al considerar que una parte del agua se devuelve como agua residual para su tratamiento o directamente a los ríos).

Por otra parte, respecto a los indicadores relacionados con la contaminación del aire, cabe destacar el “potencial de calentamiento global”. Para la evaluación de este indicador se pueden considerar diversos horizontes temporales. En los estudios de ACV aplicados a la edificación se utiliza generalmente un horizonte temporal de 100 años. No obstante desde algunos sectores se afirma que los efectos a corto plazo podrían tener más influencia, causando una evolución más rápida del clima, que los impactos en un futuro lejano. Otro aspecto a destacar en este indicador es la contabilidad del CO<sub>2</sub> de origen biogénico (Nebel B., Cowell S., 2003). Algunos métodos no lo contabilizan, puesto que el CO<sub>2</sub> almacenado en la fase de crecimiento de la vegetación será emitido a la atmósfera al final de su vida. Esta consideración conlleva que no se hace diferencia entre la biomasa procedente de un bosque convencional y la biomasa procedente de un bosque certificado, que incluye una gestión forestal sostenible, donde por cada árbol talado se planta uno nuevo. Tampoco se hace diferencia entre los distintos usos finales de la biomasa (incineración, donde el balance de CO<sub>2</sub> sería aproximadamente neutro, frente a reutilización en otro edificio, donde el balance sería negativo, es decir, globalmente se absorbería CO<sub>2</sub>). Además, tampoco se considera el almacenamiento de carbono durante la vida útil de la biomasa.

En la actualidad, el indicador de “potencial de calentamiento global” no tiene en cuenta la localización de las emisiones, a pesar de que es cuestionable que una sustancia emitida en un clima frío de Europa tenga el mismo efecto que la misma sustancia emitida en una zona más cálida y soleada del sur de Europa, ya que la temperatura y la radiación influyen en la descomposición de diversos gases en la atmósfera.

Este problema de localización geográfica es igualmente válido para los indicadores relacionados con la contaminación del agua, en particular para el indicador de “ecotoxicidad acuática”, ya que las plantas y animales difieren enormemente en función de la ubicación.

Los indicadores de contaminación del suelo y residuos son también importantes dentro del sector de la construcción. Existen diferentes tipos de residuos: inertes, peligrosos, etc. Algunos residuos se tratan posteriormente (incineración, reciclaje,

reutilización) y una parte terminará almacenada en vertederos. En este caso, existen diversos indicadores que pueden usarse, correspondientes a los diferentes tipos de residuos utilizados, o a un valor ponderado de los mismos. Lo mismo puede aplicarse a los residuos nucleares, donde existen varios tipos de residuos en función de su actividad y su vida.

Finalmente, respecto a los indicadores relacionados con los “daños, salud y biodiversidad” cabe destacar que los indicadores “DALY” y “PDF” son muy globales e incluyen algunos supuestos sobre los que existe incertidumbre, como por ejemplo, las consecuencias del calentamiento global sobre la salud humana. Asimismo el indicador basado en el volumen crítico (volumen de aire o agua necesario para diluir la cantidad emitida de un contaminante por debajo de los límites establecidos por la legislación) presenta algunos inconvenientes, entre los que cabe citar las diferencias en los límites legales en función de la zona geográfica analizada, que en muchas ocasiones se establecen por motivos más políticos que científicos.

En definitiva, a partir de todo lo anterior, cabe concluir que se requiere profundizar en la investigación para obtener una cuantificación de los distintos indicadores medioambientales más precisa y adaptada a las distintas zonas geográficas. La siguiente tabla muestra el valor de varios indicadores medioambientales en Europa (Guinée J.B., et al., 2001).

Indicador	Valor por habitante y año en Europa
Agotamiento de recursos abióticos	32,6 kg eq. Sb
Consumo de energía primaria	168.400 MJ (1999)
Potencial de calentamiento global	14.600 kg eq. CO <sub>2</sub>
Acidificación potencial	84,2 kg eq. SO <sub>2</sub>
Eutrofización potencial	38,4 kg eq. PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Niebla de verano	25,4 kg eq. C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
Potencial de disminución de la capa de ozono	0,256 kg eq. CFC11
Toxicidad humana	0,0068 DALY
Ecotoxicidad	13,700 PDF*m <sup>2</sup> *year
Residuos peligrosos	107 kg

Tabla 2.6. Valores de distintos indicadores medioambientales en Europa

Conviene destacar que en un estudio determinado se pueden utilizar diferentes metodologías de evaluación de impacto (Hauschild M., et al., 2009; Frischknecht R., et al., 2007) con objeto de contrastar los resultados obtenidos para distintas categorías de impacto. Las metodologías de evaluación incluyen normalmente varios de los indicadores medioambientales presentados anteriormente.

La siguiente tabla muestra las metodologías más comunes en los estudios de ACV. Llama la atención que ninguna de ellas haya sido desarrollada ni cuente con la participación de entidades españolas.

Metodología	Características	Entidad desarrolladora
CML 92	Método de impacto intermedio muy utilizado con una caracterización relativamente simple y diversas opciones de normalización	CML (Holanda)
CML baseline 2000	Actualización del método CML 92 con modelos más avanzados	CML (Holanda)
EPS 2000	Método orientado a daños, que considera la monetarización (disposición a pagar) como ponderación	IVL (Suecia)
Ecoindicador 95	Método de distancia al objetivo, basado en objetivos científicos. Incluye modelos orientados a los daños	PRé (Holanda)
Ecoindicador 99	Actualización del método Ecoindicador 95. Método orientado a los daños, utiliza indicadores de categoría de impacto final. Incluye 3 versiones que consideran distintas hipótesis	PRé (Holanda)
IMPACT 2002+	Método orientado a los daños con muchas semejanzas al método Ecoindicador 99, pero con los factores de toxicidad completamente recalculados	EPFL (Suiza)
TRACI 2002	Método de impacto intermedio desarrollado por US EPA	US EPA (Estados Unidos)
Ecopuntos 97 y 2006	Método de distancia al objetivo, basado en los objetivos de la política suiza. También conocido como método Ecoscarcity o UBP. Existen dos versiones: 1997 y 2006, siendo ésta la última actualización	E2, ESU services (Suiza)
EDIP 97 y 2003	Método de caracterización y normalización desarrollado por la DTU. Existen dos versiones: 1997 y 2003, siendo ésta la última actualización	EDIP - DTU (Dinamarca)
LIME	Método japonés que incluye diversas categorías de impacto intermedio y final	AIST (Japón)
LUCAS	Método canadiense de impacto intermedio que adapta algunos modelos de caracterización de TRACI 2002 e IMPACT 2002+	CIRAIG (Canadá)
RECIPE	Método reciente que integra y actualiza los métodos Ecoindicador 99 y CML 2, incluyendo categorías de impacto intermedio y final	RUN, PRé, CML y RIVM (Holanda)
MEEUP	Metodología de impacto intermedio enfocada al diseño ecológico de productos	VhK (Holanda)

Tabla 2.7. Metodologías de evaluación de impactos del ciclo de vida

Las metodologías de evaluación pueden incluir modelos de impacto intermedio y/o de impacto final. Los modelos de impacto intermedio (orientados a los problemas) muestran el resultado como la contribución a los diferentes problemas ambientales (ej: calentamiento global, agotamiento del ozono estratosférico, etc.). Por el contrario, los modelos de impacto final (orientados a los daños) evalúan el daño real producido como consecuencia de dichos problemas ambientales. Por ejemplo, el daño a la salud humana como consecuencia de la destrucción del ozono estratosférico podría ser el aumento de cáncer de piel.

A continuación se presentan las principales características de las metodologías de evaluación más comunes.

El método *CML 92* (Guinée J.B., et al., 2001) fue desarrollado por el Centro de Estudios Medioambientales (*CML*) de la Universidad de Leiden (Holanda). Las categorías de impacto que se consideran son relativamente fáciles de comprender: efecto invernadero, capa de ozono, eco-toxicidad y toxicidad humana, eutrofización, acidificación, polución, recursos energéticos y residuos sólidos. Existen diversos conjuntos de normalización: Países Bajos (1993/94), Oeste de

Europa (1990) y Mundial (1993). El número aproximado de sustancias considerado es de 800.

El método *CML 2 baseline 2000* es una actualización del método *CML 92*, que incluye modelos más avanzados. Las categorías de impacto consideradas son: recursos abióticos, calentamiento global, disminución de la capa de ozono, toxicidad (para personas, ecosistemas acuáticos y terrestres), oxidación fotoquímica, acidificación y eutrofización. Incluye diversos conjuntos de normalización: Países Bajos (1997), Oeste de Europa (1995), Mundial (1990 ó 1995).

El método *EPS- Environmental Priority Strategies 2000* (Steen B., 1999a-b) considera las estrategias medioambientales prioritarias en el diseño de productos, evaluando la restauración del daño ambiental de los productos desde un punto de vista económico. Por ello, resulta un método especialmente indicado como herramienta para el proceso de desarrollo de un producto. Las numerosas categorías de impacto consideradas se agrupan en cuatro categorías de daño: salud humana (que incluye la esperanza de vida, enfermedades, etc.), capacidad de regeneración del ecosistema (que incluye la capacidad de crecimiento de la masa forestal, la acidificación de los suelos, etc.), el stock de recursos (que incluye el agotamiento de reservas) y la biodiversidad (que incluye la extinción de especies). El número aproximado de sustancias cubierto dentro del método es de 200.

Actualmente existen dos métodos de evaluación de impactos basados en los ecoindicadores: *Ecoindicador 95* y *Ecoindicador 99*, si bien éste último es el más usado. Los ecoindicadores son números que representan el impacto ambiental total de un producto o servicio, cuya interpretación es relativamente simple: cuanto mayor es el indicador, mayor es el impacto ambiental asociado.

El método *Ecoindicador 95* surge a partir de un proyecto de I+D conjunto organizado por diversas asociaciones, institutos de investigación y empresas: *PRé consultants*, *Philips Consumer Electronics*, *NedCar (Volvo/Mitsubishi)*, *Océ Copiers*, *Schuurink*, *CML Leiden*, *TU-Delft*, *IVAM-ER (Ámsterdam)* y *CE Delft*. El método se adecua fielmente a la metodología recomendada por la *SETAC*. Se consideran 10 categorías de impacto: efecto invernadero, capa de ozono, acidificación, eutrofización, metales pesados, sustancias cancerígenas, polución, pesticidas, recursos energéticos y residuos sólidos. Los factores de normalización se basan en datos europeos de 1990. Existen dos conjuntos de normalización: *Europa g* y *Europa e*, que utilizan distintas hipótesis a la hora de extrapolar datos.

El método *IMPACT 2002+* (Jolliet O., et al., 2003) es básicamente una combinación de los métodos *IMPACT- IMPact Assessment of Chemical Toxicics 2002* (Pennington D.W., et al., 2005), *Ecoindicador 99* (Goedkoop M, Spriensma R, 2000) y *CML* (Guinée J.B., et al., 2001) entre otros, desarrollando nuevos modelos y conceptos para la evaluación de la toxicidad humana y de la ecotoxicidad. Contiene 14 categorías de impacto intermedio y 4 categorías de daño final: salud humana, calidad del ecosistema, cambio climático y recursos. El número aproximado de sustancias considerado en este método asciende a 1.500.

*TRACI 2002* (Bare J.C., et al., 2003; Bare J.C., et al., 2007) fue desarrollado por la *US EPA* como un método de impacto intermedio que considera las condiciones ambientales en EE.UU. en su conjunto y en cada Estado. Incluye 14 categorías de impacto intermedio: agotamiento del ozono, calentamiento global, acidificación, eutrofización, oxidación fotoquímica, ecotoxicidad, salud humana-contaminantes



del aire, salud humana-cancerígenos, salud humana-no cancerígenos, combustibles fósiles, uso del suelo y uso del agua. El número aproximado de sustancias considerado es de 900.

El método *Ecopuntos 97*, también denominado *Ecoscarcity* o *UBP*, (Brand G., et al., 1998) es la actualización de un método de 1990 promovido por el Ministerio Suizo de Medioambiente, en consonancia con las políticas medioambientales establecidas en este país. Incluye un buen número de categorías de impacto, entre las que cabe destacar los niveles de NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, Pb, Cd, Zn y Hg en el aire, los niveles de Cr, Zn, Cu, Cd, Hg, Pb y Ni en el agua, pesticidas, residuos, etc. Existen 3 versiones del método que difieren en los factores de normalización a aplicar. La última actualización del método es del año 2006, incluyendo nuevos objetivos medioambientales y considerando más de 400 sustancias.

El método *EDIP-Environmental Design of Industrial Products 97* (Wenzel H., Hauschild M., Alting L., 1997; Hauschild M., Wenzel H., 1998) fue desarrollado por el Centro de Diseño Medioambiental de Productos Industriales de Holanda. Posee algunas similitudes con el método *CML 92* e implica una actualización y mejora en diversos aspectos. Las categorías de impacto consideradas son: calentamiento global, disminución capa de ozono, toxicidad para las personas, ecosistemas acuáticos y terrestres, acidificación, eutrofización, smog fotoquímico, polución, residuos peligrosos, residuos radioactivos, y recursos. La última actualización del método *EDIP* es de 2003 (Hauschild M., Potting J., 2005), e incluye factores de caracterización específicos para más de 40 regiones europeas, considerando un número aproximado de 500 sustancias.

El método *LIME* (Itsubo N., et al., 2004; Hayashi K., et al., 2000; Hayashi K., et al., 2004; Hayashi K., et al., 2006) se desarrolló en Japón, sobre la base de diversas aportaciones de expertos de todo el mundo, y es utilizado ampliamente en dicho país. Combina 15 categorías de impacto intermedio y 16 categorías de impacto final que se agrupan posteriormente en 4 categorías finales: salud humana, bienestar social, biodiversidad y producción primaria. El número aproximado de sustancias considerado es de 1.000.

El método *LUCAS* (Toffoletto C., et al., 2007) fue desarrollado por primera vez en 2005 con el objetivo de poder disponer de una metodología adaptada al contexto canadiense. Se basa en los modelos de caracterización de otras metodologías de evaluación de impacto existentes como *TRACI 2002* e *IMPACT 2002+*, que son adaptadas a los inventarios de ciclo de vida de Canadá. El método considera 11 categorías de impacto intermedio y cubre alrededor de 800 sustancias.

El método *ReCIPE* es una continuación de las metodologías *Ecoindicador 99* y *CML 2*, integrando y armonizando los impactos intermedios y finales dentro de un marco coherente. Aunque inicialmente se pretendía hacer una integración de los dos métodos, todas las categorías de impacto se han remodelado y actualizado (De Schryver A.M., et al., 2007, Huijbregts M.A.J., et al., 2005a,b; Wegener Sleeswijk A., et al., 2008), a excepción de las radiaciones ionizantes. El método incluye 18 categorías de impacto intermedio y 3 categorías de impacto final: salud humana, calidad del ecosistema y recursos, cubriendo un número aproximado de 3.000 sustancias.

La metodología *MEEuP* (Kemna R., et al., 2005) fue desarrollada por la consultora *VhK*, bajo contrato de la Dirección General de Empresa e Industria de la Comisión Europea, para evaluar el cumplimiento, por parte de distintos productos, de

diversos criterios establecidos en la Directiva 2005/32/CE de ecodiseño de productos (modificada actualmente por la Directiva 2009/125/CE), desde una perspectiva de ACV. El método incluye solamente categorías de impacto intermedio y un número aproximado de 50 sustancias.

A continuación se detallan las metodologías de evaluación de impacto que se van a utilizar en esta tesis para los estudios de ACV a realizar en materiales de construcción y edificios.

### 2.6.1.1. Demanda de energía acumulada (CED)

La demanda de energía acumulada (*Cumulative Energy Demand - CED*) ha sido una metodología utilizada desde los años 70 para analizar los sistemas energéticos (Pimentel D., Hurd L.E., Bellotti A.C., Forster M.J., et al., 1973; Boustead I., Hancock G.F., 1979; VDI, 1997). Según esta metodología, la evaluación de los impactos medioambientales relacionados con un producto o proceso se basa en un único parámetro: la demanda total de energía primaria asociada a su producción, transporte, uso y disposición final. Los recursos energéticos que se pueden encontrar en la naturaleza, como el carbón, el petróleo crudo y el gas natural se conocen como recursos energéticos primarios. Su transformación en recursos energéticos secundarios como la gasolina, el gasóleo o la electricidad conlleva pérdidas, que dependen de la eficiencia de cada proceso de la cadena de transformación energética, y la necesidad de disponer de unas infraestructuras asociadas.

Por tanto, esta metodología contabiliza cada input energético directo e indirecto (asociado, por ejemplo, a la construcción de la red de suministro eléctrico, de gas, etc.). La demanda de energía acumulada se puede clasificar en energía primaria renovable que engloba energía hidráulica, biomasa, eólica, solar y geotérmica, y energía primaria no renovable de origen fósil y nuclear.

Recurso energético	Unidad	No renovable Fósil (MJ-Eq)	No renovable Nuclear (MJ-Eq)	Renovable Biomasa (MJ-Eq)	Renovable Eólica, solar y geotérmica (MJ-Eq)	Renovable Hidráulica (MJ-Eq)
Coal, brown, in ground	kg	9,90	-	-	-	-
Coal, hard, unspecified, in ground	kg	19,10	-	-	-	-
Energy, gross calorific value, in biomass	MJ	-	-	1	-	-
Gas, mine, off-gas, process, coal mining	Nm <sup>3</sup>	39,80	-	-	-	-
Gas, natural, in ground	Nm <sup>3</sup>	38,29	-	-	-	-
Uranium, in ground	kg	-	560.000	-	-	-
Oil, crude, in ground	kg	45,80	-	-	-	-
Wood, hard, standing	m <sup>3</sup>	-	-	PCS (Poder Calorífico Superior)	-	-
Wood, soft, standing	m <sup>3</sup>	-	-	PCS (Poder Calorífico Superior)	-	-

Recurso energético	Unidad	No renovable Fósil (MJ-Eq)	No renovable Nuclear (MJ-Eq)	Renovable Biomasa (MJ-Eq)	Renovable Eólica, solar y geotérmica (MJ-Eq)	Renovable Hidráulica (MJ-Eq)
Wood, unspecified, standing	m <sup>3</sup>	-	-	PCS (Poder Calorífico Superior)	-	-
Peat, in ground	kg	9,90	-	-	-	-
Energy, geothermal, converted	MJ	-	-	-	1	-
Energy, kinetic (in wind), converted	MJ	-	-	-	1	-
Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	MJ	-	-	-	-	1
Energy, solar, converted	MJ	-	-	-	1	-
Energy, gross calorific value, in biomass, primary forest	MJ	9,90	-	-	-	-

Tabla 2.8. Factores de caracterización para el cálculo de la demanda de energía acumulada

El indicador numérico de la demanda de energía acumulada se obtiene a partir de la suma de sus dos componentes: energía primaria no-renovable y energía primaria renovable, mientras que el cálculo de cada componente se realiza a partir de la suma ponderada de la masa demandada de cada recurso energético multiplicado por su factor de caracterización, de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

Demanda de energía acumulada = Energía primaria no-renovable + Energía primaria renovable

Energía primaria no-renovable =  $\sum_i \text{EPNR}_i \times m_i$ ; donde:

- $\text{EPNR}_i$ : Factor de caracterización para la energía primaria no-renovable (fósil y nuclear) del recurso energético  $i$  (MJ equivalentes/kg <sub>$i$</sub> ). Ver Tabla 2.8.
- $m_i$ : Masa demandada del recurso energético  $i$  (kg <sub>$i$</sub> ).

Energía primaria renovable =  $\sum_i \text{EPR}_i \times m_i$ ; donde:

- $\text{EPR}_i$ : Factor de caracterización para la energía primaria renovable (biomasa, eólica, solar y geotérmica, hidráulica) del recurso energético  $i$  (MJ equivalentes/kg <sub>$i$</sub> ). Ver Tabla 2.8.
- $m_i$ : Masa demandada del recurso energético  $i$  (kg <sub>$i$</sub> ).

En algunos estudios de ACV, en vez del indicador de la demanda de energía acumulada, se utiliza sólo el indicador de energía primaria no-renovable (también llamado fracción no-renovable), o el de energía primaria renovable (también llamado fracción renovable). La fracción renovable se define como el porcentaje representado por la energía primaria renovable respecto a la demanda de energía acumulada total.

A modo de ejemplo, la siguiente tabla muestra una comparación entre los factores de paso de energía final a energía primaria (Zabalza I., et al., 2009a) según el procedimiento general de certificación energética de nuevos edificios en España, establecido por un panel nacional de expertos; y según la metodología de demanda de energía acumulada (utilizando inventarios de Ecoinvent v2.0) que considera la eficiencia de toda la cadena de suministro de energía y las infraestructuras de la cuna a la tumba, dando lugar obviamente a unos impactos energéticos mayores, pero más realistas.

Fuente energética	Factores de paso de energía final a energía primaria (kWh/kWh)	
	Certificación energética España	CED + Ecoinvent v2.0
Gas natural	1,011	1,23
Gasóleo C	1,081	1,42
Carbón para uso doméstico	1	1,28
Biomasa	1	1,57
Solar térmica de baja temperatura	1	1,2
Electricidad (sistema peninsular)	2,603	3,2
Solar fotovoltaica	1	1,35

Tabla 2.9. Factores de paso de energía final a energía primaria. Fuente: (Zabalza I., et al., 2009a)

### 2.6.1.2. Potencial de calentamiento global (GWP)

El efecto invernadero de origen antropogénico producido por las emisiones asociadas a las actividades humanas debe distinguirse del efecto invernadero natural, de vital importancia para todos los seres vivos del planeta. Las emisiones humanas de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono y el metano aumentan la absorción de radiación infrarroja en la atmósfera terrestre, lo que conlleva un aumento de la temperatura de la superficie de la tierra. Durante el siglo 20, la temperatura media global aumentó alrededor de 0,6° C debido a la intensificación del efecto invernadero. Las consecuencias de ello son cambios en los patrones climáticos, desplazamientos de las masas de vegetación y cambios en la distribución de las precipitaciones, así como la subida del nivel del mar debido al deshielo de la superficie polar.

El impacto de un gas emitido puede expresarse en términos de su potencial de calentamiento global en emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes (Guinée J.B., et al., 2001). El indicador numérico del potencial de calentamiento global se obtiene a partir de la suma ponderada de la masa emitida de cada contaminante multiplicada por su factor de caracterización, de acuerdo con la siguiente fórmula:

Potencial de calentamiento global =  $\sum_i \text{GWP}_i \times m_i$ ; donde:

- $\text{GWP}_i$ : Factor de caracterización para el calentamiento global de la sustancia  $i$  (kg CO<sub>2</sub> equivalentes/kg<sub>i</sub>). Ver Tabla 2.11.
- $m_i$ : Masa emitida de la sustancia  $i$  (kg<sub>i</sub>).

El indicador del potencial de calentamiento global puede evaluarse sobre la base de los factores de caracterización de 2001 (Albritton D.L., Meira-Filho L.G., 2001) ó de 2007 (Forster P., et al., 2007) del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC). Considerando los distintos tiempos de permanencia de los gases

emitidos en la atmósfera se puede hablar de 3 horizontes temporales: 20 (corto plazo), 50 (medio plazo) y 100 años (largo plazo), siendo éste último el más habitual en los estudios de ACV.

En la Tabla 2.10 se comparan los factores de paso de energía final a emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> (Zabalza I., et al., 2009a) según el procedimiento general de certificación energética de nuevos edificios en España y la metodología de potencial de calentamiento global (utilizando inventarios de Ecoinvent v2.0). Mientras que con esta metodología se considera el ciclo de vida completo, obteniendo unos resultados más realistas, con el procedimiento de certificación energética sólo se incluyen las emisiones asociadas a la combustión de los combustibles fósiles (gas, gasóleo, butano, etc.) y las emisiones del mix eléctrico nacional, asignando cero emisiones a las tecnologías renovables.

Conviene destacar que las emisiones obtenidas en la Tabla 2.10 considerando el ciclo de vida (columna derecha) son similares a otros estudios de ACV ya publicados (Varun. Bhat I.K., Prakash R., 2009).

Fuente energética	Factores de paso de energía final a emisiones (g CO <sub>2</sub> /kWh)	
	Certificación energética España	CED + Ecoinvent v2.0
Gas natural	204	274,6
Gasóleo C	297	340,4
Carbón para uso doméstico	347	485,8
Biomasa	0	50,1
Solar térmica de baja temperatura	0	10,8
Electricidad (sistema peninsular)	649	556,2
Solar fotovoltaica	0	52,4

Tabla 2.10. Factores de paso de energía final a emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> Fuente: (Zabalza I., et al., 2009a)

La siguiente tabla muestra los factores de caracterización de 2007 basados en los modelos desarrollados por el IPCC y expresados como potencial de calentamiento global para un horizonte temporal a largo plazo de 100 años.

Sustancia	Factor (kg CO <sub>2</sub> Eq/kg)	Sustancia	Factor (kg CO <sub>2</sub> Eq/kg)
Sulfur Hexafluoride	22.800	Ethane, 1,1,2,2-tetrafluoro-, HFC-134a	1.430
Sulphur, trifluoromethyl pentafluoride	17.700	Methan, tetrachloro-, CFC-10	1.400
Nitrogen fluoride	17.200	Propane, 1,1,3,3-tetrafluoro-, HFC-245fa	1.030
Methane, trifluoro-(difluoromethoxy)-, HFE-125	14.900	Butane, 1,1,1,3,3-pentafluoro-, HFC-365mfc	794
Methane, trifluoro-, HFC-23	14.800	Methane, trifluoro-methoxy-, HFE-143a	756
Methane, chlorotrifluoro-, CFC-13	14.400	Chloroform	756
Ethane, hexafluoro-, HFC-116	12.200	Ethane, 1,1-dichloro-1-fluoro-, HCFC-141b	725
Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	10.900	Ethane, 1,1,2,2-tetrafluoromethoxy-, HFE245cb2	708
PFPME	10.300	Methane, difluoro-, HFC-32	675
Butane, perfluorocyclo-, PFC-318	10.300	Ethane, 2,2,2-trifluoromethoxy-, HFE245fa2	659
Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	10.000	Ethane, 2-chloro-1,1,2,2,3-pentafluoro-, HCFC-225cb	609
Propane, 1,1,1,3,3,3-hexafluoro-, HCFC-236fa	9.810	HFE-347pcf2	595
Hexane, perfluoro-	9.300	Ether, 1,1,2,2-Tetrafluoroethyl 2,2,2-trifluoroethyl-, HFE-347 mef2	580
Pentane, perfluoro-	9.160	Ether, 1,1,2,2-Tetrafluoroethyl methyl-, HFE-254cb2	359
Butane, perfluoro-	8.860	Ethane, 1-chloro-2,2,2-trifluoro-(difluoromethoxy)-, HCFE-235da2	350
Propane, perfluoro-	8.830	Dinitrogen monoxide	298
PFC-9-1-18	7.500	Butane, nonafluoromethoxy, HFE-7100	297
Methane, tetrafluoro-, CFC-14	7.390	Ethane, 1,1,1-trichloro-, HCFC-140	146
Ethane, chloropentafluoro-, CFC-115	7.370	Ethane, 1,1-difluoro-, HCFC-152a	124

Sustancia	Factor (kg CO <sub>2</sub> Eq/kg)	Sustancia	Factor (kg CO <sub>2</sub> Eq/kg)
Methane,bromotrifloro-, Halon 1301	7140	Propane, 3,3-dichloro-1,1,1,2,2-pentafluoro-, HCFC-225ca	122
Methane, pentafluorometathoxy-, HFE-134	6320	Propane, 1,1,2,2,3,3, hexafluoromethoxy-HFE-356pcc3	110
Ethane, 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoro-,CFC-113	6130	Ethane, 2,2-dichloro-1,1,1-trifluoro-, HCFC-123	77
Methane, trichlorofluoro-, CFC-11	4750	Butane, nonafluoroethoxy, HFE-569sf2	59
Ethane, 1,1,1-trifluoro-, CFC-11	4470	Methane, fossil	25
Ethane, pentafluoro-, HFC-125	3500	Methane, biogenic	25
Propane, 1,1,1,2,3,3,3-heptafluoro-, HFC-227ea	3220	Methane	25
HFE-236ca12(HG-10)	2800	Metahne, monochloro-, R-40	13
Ethane-236ca12(HG-10)	2310	Methane, dichloro-, HCC-30	8,7
Methane, 1-chloro-1, 1-difluoro-, HCFC-142b	1980	Methane, bromo-, Halon 1001	5
HFE-43-10pccc124(H-Galden1040x)	1870	Dimethyl ether	1
Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	1810	Carbon dioxide, land trasnformation	1
Pentane,2,3-dihydroperfluoro-, HFC-4310mee	1640	Carbon dioxide, fossil	1
HFE-338pcc13(HG-01)	1500	Carbon dioxide, biogenic	1
Ethane,1,1,2,2-tetrafluoro-, HFC-134	1430	Carbon dioxide	1
		Carbon dioxide, in air	-1

Tabla 2.11. Factores de caracterización para el cálculo del potencial de calentamiento global según el IPCC (2007)

### 2.6.1.3. Huella hídrica

La desecación está constituida por un conjunto de problemas relacionados con el medioambiente, causados por la escasez de agua debido a la extracción de aguas subterráneas para la industria, la agricultura y el suministro de agua potable. En el siglo 20, mientras la población mundial se ha triplicado, el consumo de agua dulce se ha multiplicado por seis (Martínez A., 2009). En la actualidad no existe ninguna metodología que posibilite la incorporación de la desecación en el AVC en forma de potencial de desecación (Guinée J.B., et al., 2001). Como en el caso de la mayoría de los impactos potenciales (potencial de calentamiento global, acidificación potencial, etc.) la desecación potencial no conlleva necesariamente un impacto, pero el conocimiento de este indicador potencial sería de gran utilidad para evaluar el riesgo potencial asociado a los impactos reales.

En el sector de la construcción, el consumo de agua es un aspecto importante (Polster B., et al., 1996), por lo que en ausencia de un factor de caracterización para la desecación, se propone utilizar un indicador (Frischknecht R., et al., 1996), que simplemente se refiere a la cantidad de agua utilizada. Este indicador contabiliza de forma agregada las cifras de consumo de agua incluidas en los inventarios (por ejemplo, para la fabricación de los materiales o la producción de electricidad), excluyendo algunos tipos de fuentes de agua como el agua de origen marino u oceánico.

El indicador numérico de la huella hídrica utilizado en esta tesis es una modificación del indicador anterior, agregando todas las extracciones de agua dulce procedentes de ríos, lagos y pozos, incluyendo el agua utilizada en procesos de enfriamiento, pero excluyendo el agua utilizada en turbinas hidráulicas para la producción eléctrica.

Huella hídrica =  $\Sigma$  Consumo de agua dulce -  $\Sigma$  Agua turbinada en la producción eléctrica.

Normalmente la consideración del agua utilizada en las turbinas hidráulicas para la producción eléctrica produce un fuerte aumento del indicador, distorsionando la relevancia de los verdaderos consumos de agua y dificultando la interpretación de los resultados. De hecho, el turbinado del agua no supone un consumo efectivo de

agua, ya que el agua que sale de las turbinas puede consumirse a lo largo del cauce para cualquier otro proceso. Por todo ello, se ha decidido eliminar el turbinado de agua del cálculo de la huella hídrica.

#### 2.6.1.4. Ecoindicador 99

Este método es una actualización del método Ecoindicador 95. Existen tres versiones del Ecoindicador 99 (Goedkoop M., Spriensma R., 2000) que implican distintas suposiciones en los modelos medioambientales considerados, siendo la Perspectiva Jerárquica (H) la más utilizada, por tener un mayor consenso entre los paneles de expertos:

- Perspectiva Jerárquica (H): La perspectiva temporal es a largo plazo, las sustancias son incluidas si hay consenso en cuanto a su efecto. Para los combustibles fósiles se asume que no pueden ser fácilmente sustituibles.
- Perspectiva Igualitaria (E): La perspectiva temporal elegida es extremadamente a largo plazo, las sustancias son incluidas si hay una mínima y clara indicación en cuanto a su efecto. Los daños no pueden ser evitados y causarán efectos catastróficos. Para los combustibles fósiles se asume que no pueden ser fácilmente sustituibles.
- Perspectiva Individualista (I): La perspectiva temporal es a corto plazo (100 años o menos), las sustancias son incluidas si hay alguna prueba completa respecto a su efecto. Los daños pueden ser recuperados por desarrollo tecnológico y económico. Para los combustibles fósiles se asume que no pueden ser fácilmente agotados, quedándose fuera de la evaluación.

El número aproximado de sustancias considerado en el método es de 391, si bien depende de la perspectiva utilizada.

En este método, los resultados del inventario del ciclo de vida se agrupan en once categorías de impacto, aplicando los correspondientes factores de caracterización de impactos. Estas categorías de impacto son:

**Sustancias cancerígenas:** El daño se expresa en DALY /kg emisión. Los DALYs son un índice, usado también por el *WorldBank*, que representa la suma de los años de vida perdidos por mortalidad prematura y los años de vida productiva perdidos por incapacidad. El alcance de este indicador es global y local.

**Orgánicos respirados:** Efectos respiratorios como resultado de las emisiones de sustancias orgánicas al aire. El indicador de esta categoría es el Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico (POCP). Para las emisiones de sustancias al aire se calcula con el modelo de Trayectoria UNECE (que incluye el destino final), y se expresa en kg etano equivalente/kg emisión. El alcance de este indicador es global, regional y local. El daño se expresa como DALY/kg emisión.

**Inorgánicos respirados:** Efectos respiratorios causados por emisiones de partículas de SOx y NOx al aire. El daño se expresa como DALY/kg emisión. El alcance es similar al anterior indicador.

**Cambio Climático:** Los factores de caracterización están basados en los modelos desarrollados por el IPCC y expresados como potencial de calentamiento global para un horizonte temporal a largo plazo de 100 años. El factor de equivalencia se

ha dividido en tres grupos: gases con una vida atmosférica menor de 20 años que se asume que se comportan como el metano; gases con vida atmosférica entre 20 y 100 años que se comportan como el CO<sub>2</sub>; gases con vida atmosférica superior a 100 años que se comportan como el N<sub>2</sub>O. El daño se expresa como DALY/kg emisión, resultado del incremento o descenso de enfermedades y muertes causadas por el cambio climático.

Radiación: Basada en estudios para la industria nuclear alemana. El daño se expresa como DALY/kg emisión, resultado de la radiación radiactiva. El alcance del indicador es a escala regional y local.

Capa de Ozono: Los valores del potencial de reducción de ozono (ODP) han sido establecidos para hidrocarburos que contienen cloro, floro y bromo combinados o CFCs. Este indicador ha sido desarrollado por la *World Meteorological Organization (WMO)* para diferentes sustancias. El daño se expresa como DALY/kg emisión, debido al incremento de las radiaciones ultravioleta como resultado de la emisión al aire de sustancias reductoras de ozono. El alcance geográfico para este indicador es a escala global.

Ecotoxicidad: Daños a la calidad del ecosistema, como resultado de la emisión de sustancias tóxicas al aire, agua y tierra. Las principales son los metales pesados, siendo la sustancia de referencia el cromo. El daño se expresa como Fracción Potencialmente Afectada (PAF)\*m<sup>2</sup>\*año/kg emisión. El alcance es global, regional y local.

Uso del terreno: El uso de la tierra tiene impacto sobre la diversidad de especies. Dicha diversidad depende del tipo de uso del terreno y del tamaño del área local. Los daños como resultado de la conversión de la tierra o de su ocupación están basados en observaciones y se expresan como Fracción Potencialmente Desaparecida (PDF)\*m<sup>2</sup>\*año/m<sup>2</sup> de terreno.

Acidificación – Eutrofización: La acidificación es causada por la emisión de protones en los ecosistemas terrestres y acuáticos. En los sistemas terrestres los efectos se manifiestan como una disminución del crecimiento de los bosques y como consecuencia final su desaparición; mientras que en los sistemas acuáticos las consecuencias son lagos ácidos sin ningún tipo de vida silvestre. La eutrofización o exceso de nutrientes (nitrificación) en los sistemas acuáticos y terrestres puede ser causada por excesos de nitrógeno, fósforo y sustancias orgánicas degradables. El enriquecimiento con nutrientes de los ecosistemas acuáticos incrementa la producción de algas y plantas de gran tamaño que deterioran la calidad del agua y disminuyen la utilidad del ecosistema. La descomposición de la materia orgánica es un proceso que consume oxígeno causando a veces condiciones anaerobias. El daño a la atmósfera como resultado de las emisiones de sustancias acidificantes, se expresa como PDF\*m<sup>2</sup>\*año/kg emisión. La escala geográfica es similar a la del anterior indicador.

Minerales: Energía necesaria adicional para extraer cada kilogramo de mineral, como resultado del descenso de las reservas minerales. El alcance geográfico es global.

Combustibles fósiles: Energía necesaria adicional para extraer recursos fósiles, como resultado de la menor calidad de dichos recursos. El alcance geográfico es global.



La siguiente tabla muestra un extracto de los principales factores de caracterización para el cálculo de los indicadores numéricos de las categorías de impacto del Ecoindicador 99.

Categoría de impacto	Compartimento	Sustancia	Factor (DALY/kg)
Cancerígenos	Agua	Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	2,02E3
	Aire	Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	1,79E2
	Agua	Dibenz(a,h)anthracene	4,07E1
	Aire	Dibenz(a,h)anthracene	3,10E1
	Suelo	Dibenz(a,h)anthracene	2,44E1
	Suelo	Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	7,06
	Agua	Benzo(a)pyrene	2,99
	Suelo (agrícola)	Cadmium	2,17
Categoría de impacto	Compartimento	Sustancia	Factor (DALY/kg)
Respirados orgánicos	Aire	Benzen, 1,3,5-trimethyl-	2,98E-6
	Aire	Toluene, 3,5-diethyl-	2,81E-6
	Aire	Benzen, 3-5-dimethylethyl-	2,81E-6
	Aire	Benzene, 1,2,4-trimethyl-	2,72E-6
	Aire	Benzene, 1,2,3-trimethyl-	2,72E-6
	Aire	Butene	2,47E-6
	Aire	2-Butene (trans)	2,47E-6
	Aire	2-Butene (cis)	2,47E-6
Categoría de impacto	Compartimento	Sustancia	Factor (DALY/kg)
Respirados inorgánicos	Aire	Particulates, diesel soot	7,00E-4
	Aire	Particulates, < 2.5 um	7,00E-4
	Aire	Particulates, >2.5 um, and <10 um	3,75E-4
	Aire	Particulates, < 10 um ( stationary)	3,75E-4
	Aire	Particulates, <10 um (mobile)	3,75E-4
	Aire	Particulates, < 10um	3,75E-4
	Aire	Nitric oxide	1,37E-4
	Aire	Particulates, unspecified	1,10E-4
Categoría de impacto	Compartimento	Sustancia	Factor (DALY/kg)
Cambio climático	Aire	Sulfur hexafluoride	5,30E-3
	Aire	Methane, chlorotrifluoro-, CFC-13	3,13E-3
	Aire	Methane, trifluoro-, HFC-23	2,60E-3
	Aire	Ethane, chloropentafluoro-, CFC-115	2,29E-3
	Aire	Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	2,18E-3
	Aire	Ethane, hexafluoro-, HFC-116	2,00E-3
	Aire	Butane, perfluorocyclo-, PFC-318	1,90E-3
	Aire	Pentane, perfluoro-	1,70E-3
Categoría de impacto	Compartimento	Sustancia	Factor (DALY/kBq)
Radiación	Agua (océano)	Iodine-129	1,00E-07
	Agua (océano)	Curium alpha	5,70E-08
	Agua (océano)	Americium-241	3,10E-08
	Agua (océano)	Plutonium-alpha	7,40E-09
	Agua (océano)	Carbon-14	1,20E-09
	Agua (océano)	Cobalt-60	3,90E-10
	Agua (océano)	Ruthenium-106	1,40E-10
	Agua (océano)	Cesium-137	7,90E-11
Categoría de impacto	Compartimento	Sustancia	Factor (DALY/kg)
Capa de ozono	Aire	Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	1,26E-2
	Aire	Ethane, 1,2- dibromotetrafluoro-, Halon 2402	7,37E-3
	Aire	Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	5,37E-3
	Aire	Methane, bromodifluoro-, Halon 1201	1,47E-3
	Aire	Methane, dibromodifluoro-, Halon 1202	1,32E-3
	Aire	Methane, tetrachloro-, CFC-10	1,26E-3
	Aire	Methane, trichlorofluoro-, CFC-11	1,05E-3
	Aire	Methane, chlorotrifluoro-, CFC-13	1,05E-3

Categoría de impacto	Compartimento	Sustancia	Factor (PAF <sup>2</sup> m <sup>2</sup> año/kg)
Ecotoxicidad	Suelo	Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	2,09E6
	Agua	Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	1,87E6
	Aire	Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	1,32E6
	Suelo (industrial)	Thiram	3,38E5
	Suelo (industrial)	Azinphos-methyl	2,21E5
	Suelo (industrial)	Fentin acetate	1,35E5
	Aire	Azinphos-methyl	1,10E5
Suelo	Cadmiun	9,94E4	

Categoría de impacto	Compartimento	Sustancia	Factor (PDF <sup>2</sup> m <sup>2</sup> año/kg)
Acidificación / eutrofización	Aire	Ammonia	15,57
	Aire	Nitric oxide	8,789
	Aire	Nitrogen oxides	5,713
	Aire	Nitrogen dioxide	5,713
	Aire	Nitrate	5,713
	Aire	Sulfur oxides	1,041
	Aire	Sulfus dioxide	1,041
Aire	Sulfate	1,041	

Categoría de impacto	Compartimento	Sustancia	Factor (PDF <sup>2</sup> m <sup>2</sup> año/m <sup>2</sup> a)
Uso del suelo	Crudo	Occupation, urban, continuously built	1,15
	Crudo	Occupation, permanent crop, vine, intensive	1,15
	Crudo	Occupation, permanent crop, vine, extensive	1,15
	Crudo	Occupation, permanent crop, vine	1,15
	Crudo	Occupation, permanent crop, fruit, intensive	1,15
	Crudo	Occupation, permanent crop, fruit extensive	1,15
	Crudo	Occupation, permanent crop, fruit	1,15
	Crudo	Occupation, permanent crop	1,15

Categoría de impacto	Compartimento	Sustancia	Factor (MJ adicionales/kg)
Minerales	Crudo	Tin, in ground	600
	Crudo	Tin, 79% in cassiterite, 0,1% in crude ore, in ground	600
	Crudo	Mercury, in ground	165,5
	Crudo	Cinnabar, in ground	165,5
	Crudo	Molybdenum, in ground	41
	Crudo	Molybdenum, 0,11% in sulfide, Mo.4,1E-2% and Cu 0,36% in crude ore	41
	Crudo	Molybdenum, 0,11% in sulfide, Mo. 0,41% and CU 0,36% in crude ore	41
	Crudo	Molybdenum, 0,025% in sulfide, Mo. 8,2E-3% and Cu 0,39% in crude ore	41

Categoría de impacto	Compartimento	Sustancia	Factor (MJ adicionales/m <sup>3</sup> )
Combustibles fósiles	Crudo	Oil, crude, 38400 MJ per m <sup>3</sup> , in ground	5,530
	Crudo	Gas, natural, 36,6 MJ per m <sup>3</sup> , in ground	5,49
	Crudo	Gas, mine, off-gas, process, coal mining/m <sup>3</sup>	5,38
	Crudo	Gas, natural feedstock, 35 MJ per m <sup>3</sup> , in ground	5,25
	Crudo	Gas, natural 35 MJ per m <sup>3</sup> , in ground	5,25
	Crudo	Gas, natural, in ground	5,173
	Crudo	Gas, natural, feedstock, 46,8 MJ per kg, in ground	7,02
	Crudo	Gas, natural in ground	7,02

Tabla 2.12. Principales factores de caracterización para el cálculo de los indicadores numéricos de las categorías de impacto del Ecoindicador 99

El indicador numérico de cada categoría de impacto se obtiene a partir de la suma ponderada de la cantidad cada sustancia (medida en masa, volumen, actividad radiológica u ocupación) clasificada dentro de dicha categoría multiplicada por su factor de caracterización, de acuerdo con la siguiente fórmula:

Indicador categoría de impacto =  $\sum_i FCCI_i \times m_i$ ; donde:

- FCCI<sub>i</sub>: Factor de caracterización para la categoría de impacto considerada de la sustancia i (DALY/kg<sub>i</sub> o DALY/kBq<sub>i</sub> o PAF\*m<sup>2</sup>\*año/kg<sub>i</sub> o PDF\*m<sup>2</sup>\*año/kg<sub>i</sub> o PDF\*m<sup>2</sup>\*año/m<sup>2</sup>a<sub>i</sub> o MJ adicionales/kg<sub>i</sub> o MJ adicionales/m<sup>3</sup><sub>i</sub>). Ver Tabla 2.12.
- m<sub>i</sub>: Cantidad de la sustancia clasificada i: masa (kg<sub>i</sub>) o volumen (m<sup>3</sup><sub>i</sub>) o actividad radiológica (kBq<sub>i</sub>) u ocupación (m<sup>2</sup>a).

Las anteriores categorías de impacto se agrupan en tres categorías de daño, aplicando los correspondientes factores de caracterización de daños. El propósito de esta agrupación es combinar las categorías de impacto que tienen la misma unidad del indicador en categorías de daño y así simplificar la interpretación posterior al reducir el número de categorías de impacto. Los resultados de las categorías de impacto se agrupan en los siguientes tipos de daños:

- Daños a la Salud Humana: Se expresa como la suma del número de años de vida perdidos y el número de años vividos incapacitado (DALY). En esta categoría de daño se incluyen las siguientes categorías de impacto: Cancerígenos, Orgánicos respirados, Inorgánicos respirados, Cambio Climático, radiación y Capa de Ozono.
- Daños a la calidad del Ecosistema: Se expresa como la pérdida de especies en cierta área, durante cierto tiempo (PDF\*m<sup>2</sup>\*año). Se incluyen las siguientes categorías de impacto: Ecotoxicidad, Acidificación - Eutrofización y Uso del Terreno.
- Daños a los Recursos: Se expresa como la energía necesaria adicional (MJ) para futuras extracciones de minerales y combustibles fósiles. La humanidad siempre extraerá los mejores recursos primero, dejando los recursos de más baja calidad para futuras extracciones. Este daño será experimentado por las generaciones futuras, que deberán hacer mayores esfuerzos para extraer los recursos que queden. Este esfuerzo extra es expresado como energía adicional. Se incluyen las siguientes categorías de impacto: Minerales y Combustibles Fósiles.

<b>Categoría de daño: Salud Humana (DALY)</b>	
Sustancias cancerígenas (DALY/DALY)	1
Orgánicos respirados (DALY/DALY)	1
Inorgánicos respirados (DALY/DALY)	1
Cambio climático (DALY/DALY)	1
Radiación (DALY/DALY)	1
Capa de ozono (DALY/DALY)	1
<b>Categoría de daño: Calidad del Ecosistema (PDF*m<sup>2</sup>*año)</b>	
Ecotoxicidad (PDF*m <sup>2</sup> *año/PAF*m <sup>2</sup> *año)	0,1
Acidificación-Eutrofización (PDF*m <sup>2</sup> *año/PDF*m <sup>2</sup> *año)	1
Uso del terreno (PDF*m <sup>2</sup> *año/PDF*m <sup>2</sup> *año)	1
<b>Categoría de daño: Recursos (MJ adicionales)</b>	
Combustibles fósiles (MJ adicionales/MJ adicionales)	1
Minerales (MJ adicionales/MJ adicionales)	1

Tabla 2.13. Factores de caracterización de daños para la perspectiva H.

El indicador numérico de cada categoría de daño se obtiene a partir de la suma ponderada de cada categoría de impacto clasificada dentro de la categoría de daño multiplicada por su factor de caracterización, de acuerdo con la siguiente fórmula:

Indicador categoría de daño =  $\sum_i$  FCCD<sub>i</sub> x Indicador categoría de impacto; donde:

- FCCI<sub>i</sub>: Factor de caracterización para la categoría de daño considerada de la categoría de impacto *i* (DALY/DALY o PDF\*m<sup>2</sup>\*año/kg<sub>i</sub> / PAF\*m<sup>2</sup>\*año/kg<sub>i</sub> o PDF\*m<sup>2</sup>\*año/kg<sub>i</sub> / PDF\*m<sup>2</sup>\*año/kg<sub>i</sub> o MJ adicionales/MJ adicionales). Ver Tabla 2.13.

En este método, los factores de normalización multiplican a los resultados de la caracterización de daños y muestran el orden de magnitud de los problemas ambientales generados comparados con las cargas totales ambientales en Europa. Por otra parte, los factores de ponderación de este método multiplican a los resultados de la normalización para posteriormente obtener una puntuación total, conocida como puntuación única, para el sistema analizado.

	Factores de normalización FNCD <sub>i</sub>	Factores de ponderación FPCD <sub>i</sub>
Categoría de daño: Salud Humana	65,1	400
Categoría de daño: Calidad del Ecosistema	1,95*10 <sup>-4</sup>	400
Categoría de daño: Recursos	1,19*10 <sup>-4</sup>	200

Tabla 2.14. Factores de normalización y ponderación de daños para la perspectiva H.

Puntuación única =  $\sum_i$  FNCD<sub>i</sub> x FPCD<sub>i</sub> x Indicador categoría de daño<sub>i</sub>.

Las unidades de la puntuación única obtenida en el Ecoindicador 99 son los milipuntos (mPt), siendo un punto la representación de la centésima parte de la carga ambiental anual de un ciudadano medio europeo. Si bien el valor de dicha puntuación no es muy relevante en sí mismo, resulta de utilidad a la hora de comparar distintos sistemas analizados entre sí, aunque a día de hoy no existe un consenso científico general sobre los factores de normalización y ponderación utilizados en su cálculo.

## 2.7. Herramientas actuales de análisis de ciclo de vida. Descripción y análisis comparativo

Debido a la gran cantidad de datos que hay que manejar para realizar un ACV, es muy recomendable poder disponer de una herramienta informática que permita afrontar de forma eficiente un estudio de ACV.

Actualmente existe un buen número de aplicaciones informáticas en el mercado (Ding GKC, 2008) que permiten realizar estudios de ACV en edificios con distinto grado de detalle.

A la hora de decidir qué programa utilizar, hay que considerar diversos criterios. Uno de los puntos clave a valorar es el número de bases de datos que incorpora, su procedencia, calidad y extensión. Asimismo es conveniente que el programa permita editar las bases de datos existentes e importar con facilidad bases de datos nuevas que se puedan adquirir posteriormente. Además hay que valorar la facilidad de manejo del programa en función de la aplicación que va a tener, la posibilidad de utilizar distintos métodos de evaluación de impactos, la trazabilidad de los resultados ofrecidos y la interfaz y posibilidades gráficas que ofrece.

El ACV de un edificio se puede realizar utilizando una aplicación informática de ACV de uso general, si bien normalmente lleva mucho tiempo, ya que requiere del uso de otras herramientas para cuantificar las masas de los distintos materiales de

construcción utilizados, los consumos energéticos del edificio, etc. Por ello, en algunos países se han desarrollado aplicaciones informáticas específicas para facilitar el uso del ACV en la edificación. Hay que considerar que los principales usuarios -arquitectos e ingenieros-, disponen de un tiempo limitado para llevar a cabo estudios de ACV, por lo que es conveniente disponer de aplicaciones específicas con un interfaz adecuado capaces de integrar todos los cálculos a realizar.

A continuación se presentan y analizan las principales aplicaciones existentes, tanto de uso general como de uso específico para edificios (Peuportier B., et al., 2009).

### 2.7.1.Herramientas generales de ACV

En estas herramientas, el usuario dispone generalmente de más datos y es más libre para seleccionar las hipótesis de partida. Por el contrario, el uso de estas herramientas exige una experiencia mucho mayor, así como un alto nivel de conocimiento y comprensión de la metodología de ACV, con el fin de saber interpretar y utilizar correctamente los resultados obtenidos.

En la siguiente tabla se recopilan las principales aplicaciones de ACV de uso general actualmente disponibles, junto con la compañía desarrolladora y sus principales características (Aranda A., 2009).

Programa	Compañía desarrolladora	Contacto	Comentarios
Boustead	Boustead Consulting (Reino Unido)	<www.boustead-consulting.co.uk>	Herramienta muy completa indicada para realizar estudios de ACV dentro de la industria química, plásticos, acero, etc.
Eco-it	Pré Consultants (Países Bajos)	<www.pre.nl>	Especialmente indicado para diseñadores de productos y envases. Utiliza el Ecoindicador 99. Su manejo es sencillo
Ecopro	Sinum AG. - EcoPerformance Systems (Suiza)	<www.sinum.com>	Permite la realización sencilla de ciclos de vida del producto. Utiliza la base de datos BUWAL
Ecoscan	TNO Industrial Technology (Países Bajos)	<www.ind.tno.nl>	Puede utilizarse por encargados y técnicos responsables de implantación del ecodiseño de productos. Dispone de varias bases de datos y su manejo es sencillo
Euklid	Fraunhofer-Institut (Alemania)	<www.ivv.fhg.de>	Programa orientado a estudios de ACV de productos industriales
KCL Eco	Finnish Pulp and Paper Research Institute (Finlandia)	<www.kcl.fi/eco>	Presenta una interfaz gráfica muy completa. Posee los indicadores Ecoindicador 95 y DAIA 98 y destaca por sus datos de la industria papelera
LCAit	Chalmers Industriteknik (Suecia)	<www.ekologik.cit.chalmers.se>	Su aplicación principal es en el sector de envases y productos de papel
Miet	Universidad de Leiden (Países Bajos)	<www.leidenuniv.nl/cml/ssp/software>	Trabaja con MS Excel y se basa en datos ambientales de Estados Unidos. Gratuito
GaBi	Universidad de Stuttgart (Alemania)	<www.gabi-software.com>	Además de las posibilidades convencionales de ACV, este programa permite asociar costes a los flujos y realizar análisis económicos
Pems	Pira International (Reino Unido)	<www.piragnet.com/pack/lca_software.htm>	Puede ser utilizado tanto por principiantes como por expertos en la materia. Su interfaz gráfico es flexible

Programa	Compañía desarrolladora	Contacto	Comentarios
SimaPro	Pré Consultants (Países Bajos)	<www.pre.nl>	Permite realizar ACVs completos con múltiples métodos de evaluación de impactos. Presenta completas y variadas bases de datos. Adecuada para Departamentos de diseño o I+D
Team	Ecobilan (Francia)	<www.ecobilan.com>	Herramienta muy completa, flexible y potente aunque algo más compleja de utilizar. Permite introducir información relativa a costes
Wisard	Pricewaterhouse Coopers (Francia)	<www.pwcglobal.com>	Indicado para análisis del impacto económico y medioambiental de residuos sólidos municipales
Umberto	Ifeu-Institut (Alemania)	<www.umberto.de>	Ofrece datos de gran calidad y resultados transparentes. Las librerías de datos son completas y flexibles. Indicado para realizar ecobalances empresariales

Tabla 2.15. Aplicaciones de ACV de uso general (Fuente: Aranda A., 2009).

Conviene destacar que además de las aplicaciones anteriores, se está trabajando actualmente en la herramienta informática “*openLCA*” (Ciroth A., 2007) de código abierto, disponible de forma gratuita vía web. El proyecto “*openLCA*” es una iniciativa de *PRé Consultants* y *PE International*, en la que participan instituciones como *CML-University of Leiden*, *University of Berkeley*, *EPFL Lausanne*, *Harvard School of Public Health*, *Sylvatica* (Montreal), *Universität Wuppertal*, *Joint Research Centre of the European Commission*, y el *Centre de Ressources des Technologies pour l'Environnement (CRTE)* de Luxemburgo. La herramienta está siendo adaptada al sistema internacional *ILCD* de datos de referencia de ciclo de vida y a la nueva versión del formato *EcoSpold* que está preparando *Ecoinvent*. En la actualidad, la versión beta 1.0 de este software está disponible en la página web: <<http://sourceforge.net/projects/openlca>>.

Seguidamente se describen dos de las aplicaciones de ACV generales más utilizadas actualmente: *SimaPro* y *GaBi*.

### 2.7.1.1. *SimaPro*

*SimaPro* es una herramienta completa y flexible que permite desarrollar estudios de ACV de una amplia gama de productos, actividades o servicios, aunque no está diseñada específicamente para llevar a cabo estudios de ACV a nivel de edificio. Por eso, en caso de utilizarse para este propósito, la complejidad del estudio será mayor, debido a la necesidad de combinar esta aplicación con otras herramientas de simulación energética de edificios, así como seleccionar y definir diversos valores por defecto para la amplia gama de escenarios incluidos.

*SimaPro* ofrece una interfaz de usuario basada en la normativa ISO 14040 y puede ser utilizado para desarrollar complejos modelos parametrizados bajo distintos escenarios. La aplicación presenta los cálculos de evaluación de impacto para cada etapa del sistema estudiado, permitiendo realizar análisis de distintos escenarios de tratamiento de residuos y de reciclaje, análisis de sensibilidad y análisis de incertidumbre (Monte Carlo).

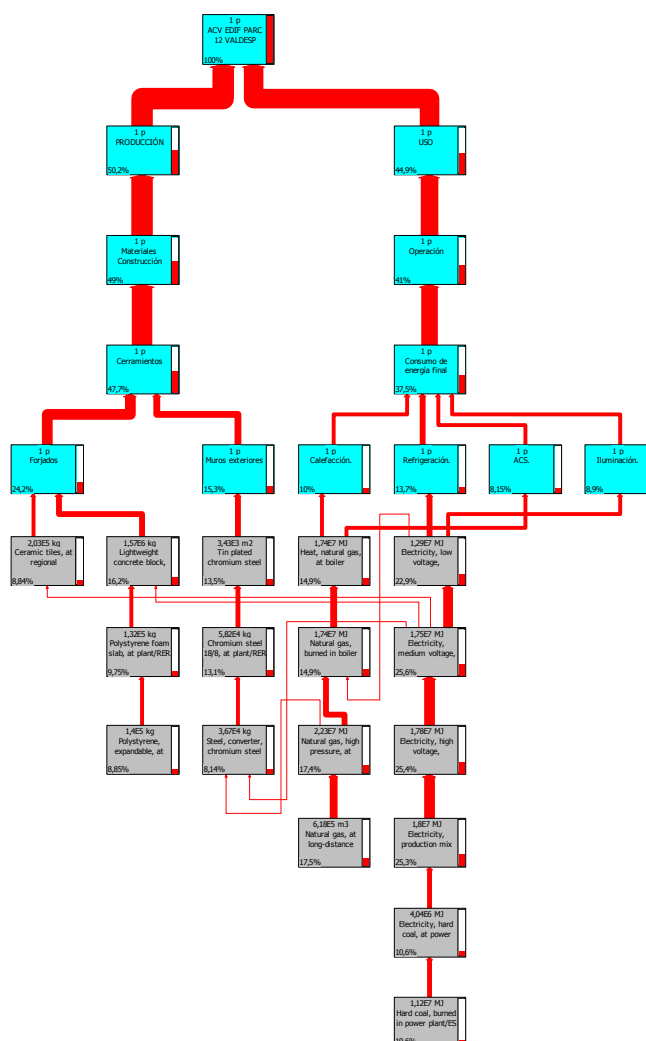


Figura 2.7. ACV de un edificio en SimaPro 7: Árbol de procesos principales del edificio

*SimaPro* permite realizar un análisis interactivo de los resultados con una buena trazabilidad y posibilita efectuar un análisis de los puntos débiles a través del árbol de procesos del sistema analizado. Los principales métodos de evaluación de impacto incluidos en *SimaPro 7* son: *Impact 2002+*, *TRACI 2002*, *CML 92* y *CML 2 baseline 2000*, *EPS 2000*, *Ecoindicador 95* y *99*, *Ecopuntos 97*, *CED* y *EDIP/UMIP 97* y *2003*.

*SimaPro 7* incorpora un amplio conjunto de bibliotecas de datos que cubren un total de 6.000 procesos distintos. Las principales bases de datos incluidas en *SimaPro 7* son: *Danish IO database* (1999), *Danish Food database* (2003), *Ecoinvent v1.2* (2005) y *v2.0* (2007), *USA input output* (2003), *Industry data* (2001), *Idemat* (2001), *Buwal 250* (1997), *ETH-ESU* (1996) y *Franklin* (1996).

### 2.7.1.2. GaBi

La herramienta *GaBi* fue desarrollada mediante la cooperación del Departamento de Ingeniería de Ciclo de Vida (*GaBi*) - Cátedra de Física de la Construcción (LBP) de la Universidad de Stuttgart <<http://www.lbpgabi.uni-stuttgart.de>> y la consultora *PE International GmbH* <<http://www.pe-international.com>>. En 1990

se lanzó la primera versión del software *GaBi* y en la actualidad está disponible la versión 4.

*GaBi 4* es uno de las herramientas más completas y utilizadas como apoyo al análisis y seguimiento del comportamiento medioambiental de productos, procesos y sistemas. *GaBi 4* permite realizar estudios de ACV, ACCV, ingeniería de ciclo de vida, diseño para el medioambiente (DfE), estudios de eficiencia energética, benchmarking, declaraciones ambientales de productos, etc. El software ofrece también la posibilidad de incluir criterios adicionales relacionados con la sostenibilidad, pudiendo asociar costes e impactos sociales a los flujos.

Por todo lo anterior, aunque no es una herramienta específica para la edificación, *GaBi 4* puede utilizarse para evaluar el comportamiento medioambiental de materiales de construcción y de edificios.

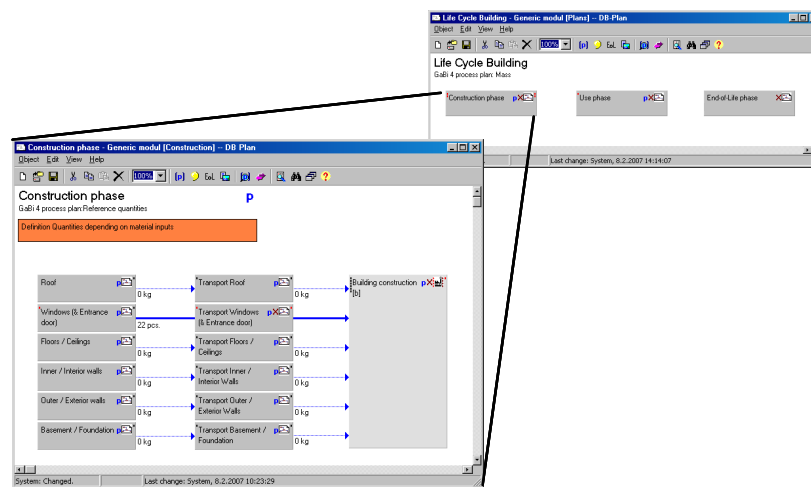


Figura 2.8. ACV de un edificio en *GaBi 4*

Al igual que *SimaPro 7*, *GaBi 4* incluye múltiples indicadores medioambientales y metodologías de evaluación de impacto, como el *CML 2001*, *EDIP 97 y 2003*, *TRACI 2002*, *Ecoindicador 95 y 99*, *UBP*, etc., y permite realizar análisis de escenarios parametrizados, análisis de sensibilidad y análisis de incertidumbre. Además de la base de datos incluida en la versión profesional, es posible añadir bases de datos adicionales complementarias.

Un módulo complementario a *GaBi 4* de gran utilidad para la modelización y el análisis medioambiental es el *GaBi i-report*. A diferencia de *GaBi 4*, que está pensado para usuarios con conocimientos de la metodología de ACV, *GaBi i-report* puede ser manejado por usuarios no expertos en ACV, una vez que ha sido convenientemente programado.

El usuario de *GaBi I-report*, sin necesidad de modificar el modelo realizado con *GaBi 4*, puede introducir los parámetros relativos al material o edificio a analizar, obteniendo de forma inmediata los resultados de la evaluación del impacto medioambiental. De este modo es posible obtener, por ejemplo, documentos de base para la preparación de declaraciones ambientales de producto. *GaBi i-report publisher* permite confeccionar los informes interactivos, mientras que *GaBi i-report viewer* es el software destinado a los usuarios finales del informe.



A modo de ejemplo, seguidamente se citan algunos proyectos relacionados con el sector de la construcción donde se ha utilizado la herramienta GaBi 4:

- “*Maximum use of renewable resources in buildings*” (NaWaRo-Max), financiado por el *German Research Ministry BMBF*, 1999 – 2001.
- “*LCA of insulating material made of hemp -Development of a completely biogenous insulation material*”, financiado por la *Deutsche Bundesstiftung Umwelt*, 2005 – 2007.
- “*ÖkoPot - Ecological market potentials of wood products*”, financiado por el *German Research Ministry BMBF*, 2005 – 2007.
- “*Environmental Improvement Potentials of Residential Buildings (IMPRO-Building)*”, financiado por la Comisión Europea, DG JRC (IPTS), 2006 – 2008.

### 2.7.2.Herramientas específicas de ACV en edificios

Varias aplicaciones específicas de ACV (Australian Government-Department of Environment and Heritage, 2001) se han desarrollado en algunos países con objeto de facilitar el uso del ACV en entre los agentes de la industria del sector de la construcción (especialmente arquitectos e ingenieros). Dichas aplicaciones disponen de una interfaz adaptada a los estudios de ACV en edificios, incluyendo algunas simplificaciones, facilitando la entrada de datos y la interpretación de los resultados obtenidos e integrando los distintos cálculos requeridos en la misma aplicación. Por el contrario, los datos a utilizar y las hipótesis a realizar están más cerradas y son más difícilmente modificables en comparación con las aplicaciones de ACV de uso general.

Si bien existen un buen número de herramientas que evalúan el impacto medioambiental de un edificio, seguidamente sólo se presentan aquellas más relacionadas con la metodología de ACV.

Programa	Compañía desarrolladora	Contacto	Comentarios
ECOEFFECT	KTH- Kungliga Tekniska högskolan, Högskolan i Gävle (Suecia)	<www.ecoeffect.se>	Evaluación de los impactos “externos” (uso de energía y materiales) e “internos” del edificio (ambiente interior y exterior) y evaluación de costes de inversión, operación y mantenimiento
ECO-SOFT	IBO-Österreichisches Institut für Baubiologie und Bauökologie (Austria)	<www.ibo.at/de/ecosoft.htm>	Cálculo de las necesidades de materiales, transporte y energía, así como emisiones al aire, vertidos al agua y suelo, y residuos asociados a la vida útil de un edificio. No válido para estudios de ACCV
EQUER	Armines, IZUBA Energies (Francia)	<www.izuba.fr>	Simulación del ciclo de vida de un edificio, proporcionando diversos indicadores medioambientales del edificio. Posibilidad de entrada de datos en 2D y 3D y vinculación con la herramienta de simulación energética COMFIE
GREENCALC+	Sureac Trust (Holanda)	<www.greencalc.com>	Evaluación del coste de prevenir los daños medioambientales de la construcción y uso de un edificio y obtención de un índice medioambiental global del edificio. El análisis abarca aspectos relacionados con la energía, materiales, agua y movilidad del edificio

Programa	Compañía desarrolladora	Contacto	Comentarios
ECO-QUANTUM	IVAM-ER (Holanda)	<www.ivam.uva.nl>	Evaluación del comportamiento medioambiental de un edificio mediante el cálculo de 4 marcadores medioambientales (recursos, emisiones, energía y residuos) que se agregan para obtener un indicador medioambiental global del edificio
LEGEP	LEGEP Software GmbH (Alemania)	<www.legep.de>	Cálculo de la demanda y costes energéticos asociados a la operación del edificio así como a la construcción, mantenimiento, rehabilitación y demolición del edificio
BECOST	VTT (Finlandia)		Cálculo del perfil ambiental (en forma de emisiones, consumo de energía y de materias primas) de los materiales y soluciones constructivas del edificio, así como del coste de las soluciones constructivas seleccionadas y del edificio completo en el ciclo de vida
ENVEST 2.0	BRE-Building Research Establishment (Reino Unido)	<envest2.bre.co.uk>	Evaluación de 12 categorías de impacto medioambiental y cálculo de la puntuación única del edificio considerando sus materiales constructivos, sistemas energéticos, etc. y cálculo de los costes del ciclo de vida
ATHENA	Athena Sustainable Materials Institute (Canadá)	<www.athenasmi.ca>	Evaluación medioambiental comparativa de diversos diseños de edificios y los materiales y soluciones constructivas seleccionadas durante las fases de diseño preliminar del edificio
BEES	NIST -National Institute of Standards and Technology (EE.UU.)	<www.bfrl.nist.gov/oe/software/bees.html>	Comparaciones entre materiales constructivos basadas en ACV y ACCV que se combinan en una sola puntuación final
LTE-OGIP	t.h.e. Software GmbH (Alemania)	<http://www.the-software.de/ogip/einfuehrung.html>	Evaluación de los impactos medioambientales en la construcción y operación de un edificio, y cálculo de los costes y el consumo de energía en su funcionamiento a partir de la definición de sus elementos constructivos

Tabla 2.16. Aplicaciones de ACV específicamente adaptadas para su uso en edificios

### 2.7.2.1. Ecoeffect

El objetivo de la aplicación *EcoEffect* (Assefaa G., et al., 2007; Assefaa G., et al., 2010) es describir cuantitativamente el impacto ambiental y sobre la salud de las edificaciones, proporcionando una base para la comparación y la toma de decisiones en las etapas de planificación, diseño y gestión de los edificios, que conduzcan a una reducción del impacto medioambiental. Actualmente la aplicación está desarrollada para viviendas multifamiliares residenciales, oficinas y escuelas.

*EcoEffect* está compuesto por una base de datos *MS Access* y una hoja de cálculo *MS Excel* con los datos de entrada, y cubre las siguientes áreas: energía, materiales, ambiente interior y exterior de los edificios y costes del ciclo de vida.

*EcoEffect* puede también ser utilizado para la formulación de objetivos medioambientales cuantitativos para cada categoría de impacto, (como por ejemplo: un cierto edificio no debe contribuir al problema del cambio climático en más de una cuantía determinada). La aplicación está diseñada para ser utilizada tanto en la planificación y diseño de nuevos edificios como en la gestión de edificios existentes. Por ejemplo, para diseño de edificios nuevos, se pueden introducir los objetivos y requisitos de comportamiento del edificio en una tabla de datos de entrada, mientras que para gestión de edificios existentes, existe una interfaz para introducir los datos sobre el ambiente interior del edificio, que se pueden obtener a partir de cuestionarios a los usuarios, medidas adicionales e inspecciones.

En la herramienta *EcoEffect*, se utiliza la metodología del ACV para el cálculo de los impactos medioambientales derivados de la utilización de energía y materiales

en los edificios. La unidad funcional se define de manera diferente dependiendo del tipo de edificio (residencial, oficina o escuela).

El impacto medioambiental asociado al uso de energía y materiales se calcula para tres tipologías: emisiones, residuos y agotamiento de los recursos naturales. La herramienta *EcoEffect* incorpora una base de datos con información medioambiental para los distintos tipos de energía y principales materiales constructivos, valores de referencia, etc., que se utilizan en los cálculos.

Con respecto al ambiente interior del edificio, se calcula el impacto sobre la salud humana y el bienestar, mientras que en el caso del ambiente exterior, se calcula el impacto sobre la salud humana y sobre los ecosistemas y la diversidad biológica. Para realizar este tipo de cálculos, la aplicación incorpora diversos datos basados en distintas normativas, valores umbrales, etc.

Por otra parte, *Ecoeffect* agrega los costes de inversión, operación (electricidad, calefacción, agua y aguas residuales) y mantenimiento para un periodo de 50 años (u otro periodo definido) presentándolo como un indicador de los costes medioambientales. Los costes que no tienen una relación evidente con los impactos medioambientales del edificio, como por ejemplo los costes de capital no se incluyen en este indicador.

Al aplicar *Ecoeffect* en edificios nuevos, el impacto más destacado suele deberse al consumo energético en la etapa de uso del edificio, si bien el resultado puede variar en función de la vida útil prevista para los materiales, los datos de inventario utilizados, etc. (Brick K., Frostell B., 2007).

### 2.7.2.2.Ecosoft

*Ecosoft* fue desarrollado por el instituto austríaco *IBO* (*Österreichisches Institut für Baubiologie und Bauökologie*), que es un instituto de investigación privado especializado en el comportamiento medioambiental de los edificios. *IBO* es también responsable de la gestión y la distribución de esta aplicación. *Ecosoft* incluye la base de datos *IBO* de materiales de construcción y calcula las necesidades de materiales, transporte y energía, así como las emisiones al aire, vertidos al agua y suelo, y residuos asociados a un edificio. La base de datos *IBO* es una adaptación de la base de datos *Ecoinvent* a la situación de Austria. *IBO* incluye valores de referencia para más de 500 materiales de construcción, y es la base de datos oficial considerada en el sistema de subvenciones a la vivienda en diferentes provincias de Austria. Los productores de materiales de construcción tienen la oportunidad de incorporar sus propias declaraciones ambientales de productos en esta base de datos, con el seguimiento, control, gestión y verificación del instituto *IBO*.

En *Ecosoft*, el ACV de los materiales de construcción se basa en la metodología *CML 2 Baseline 2000*. *Ecosoft* ofrece una amplia gama de aplicaciones, pudiendo utilizarse para el proceso oficial de certificación energética de edificios en Austria, derivado de la aplicación de la Directiva Europea 2002/91/CE de eficiencia energética de los edificios. *Ecosoft* está basado en *MS Excel*, con una interfaz de fácil uso y un coste económico de adquisición bajo.

Las principales fortalezas de *Ecosoft* son su diseño amigable y un acceso multi-nivel para distintos usuarios y propósitos. Al estar basada en *MS Excel* permite el acceso y la integración con otras aplicaciones. En contraste, su principal debilidad

es la falta de vínculos con programas de simulación térmica dinámica y con las aplicaciones CAD comúnmente utilizadas por arquitectos e ingenieros en el diseño y/o rehabilitación de edificios. Tampoco integra bases de datos ni aplicaciones de ACCV.

### 2.7.2.3.Equer

La herramienta *EQUER* (Abdelghani-Idrissi M.A., et al., 2004) permite simular el ciclo de vida de un edificio, proporcionando indicadores medioambientales a los diseñadores, lo que permite realizar la evaluación del edificio desde una perspectiva medioambiental. Para el cálculo de los impactos asociados a la fabricación de materiales y otros procesos (energía, agua, residuos y transporte) se utilizan la base de datos suiza “*Ökoinventare 1996*” (Frischknecht R., et al., 1996) y *Ecoinvent 1.2* (Frischknecht R., et al., 2004). Todos los cálculos del programa *EQUER* han sido desarrollados por *ARMINES*, mientras que la interfaz del usuario ha sido realizada por *IZUBA Energies*.

*EQUER* requiere que el usuario introduzca los siguientes datos: geometría del edificio y ubicación, materiales utilizados, cargas internas y horarios, y características de los sistemas de calefacción y refrigeración. Dependiendo del objetivo del estudio, pueden tenerse en cuenta también el consumo de agua, los residuos generados y los procesos de transporte. Estos datos se introducen en el interfaz de usuario *PLEIADES* (de simulación térmica) y *ALCYONE* (de modelado 2D-3D) generando un archivo de entrada legible y estructurado.

Las principales fortalezas de *EQUER* son su vínculo con una herramienta de simulación energética (*COMFIE*) y su interfaz de usuario amigable (*PLEIADES*, *ALCYONE*). La simulación del ciclo de vida reduce el riesgo de errores al tener en cuenta automáticamente la necesaria renovación de los materiales del edificio a lo largo de su vida útil. En cuanto a las debilidades de *EQUER*, cabe destacar que no hace cálculos de costes y que el tiempo requerido para la evaluación de un edificio, incluyendo los cálculos de la simulación energética, es de 2 a 5 días.

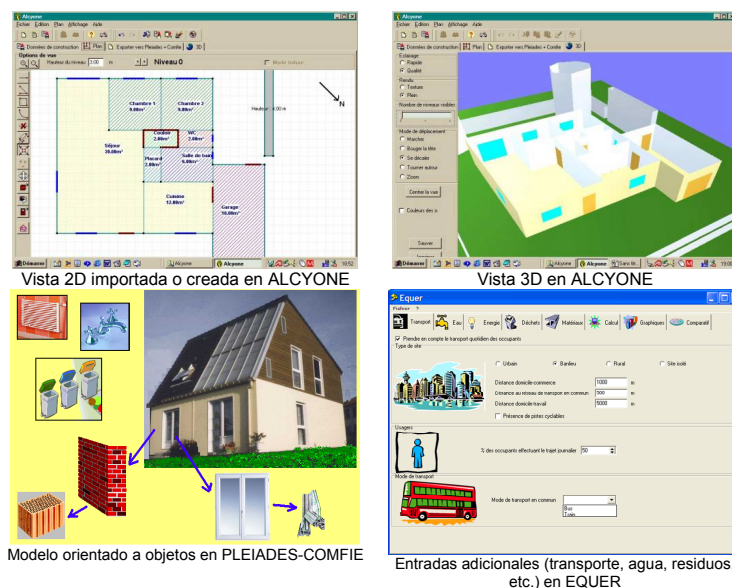


Figura 2.9. Entrada de datos en *EQUER*

Los resultados de la evaluación se representan por medio de diversos indicadores medioambientales, como la contribución al calentamiento global, la acidificación, la eutrofización, el agotamiento de los recursos abióticos, la toxicidad humana, la ecotoxicidad, la contaminación y olores, el consumo de energía primaria y de agua, la radiactividad y otros residuos generados.

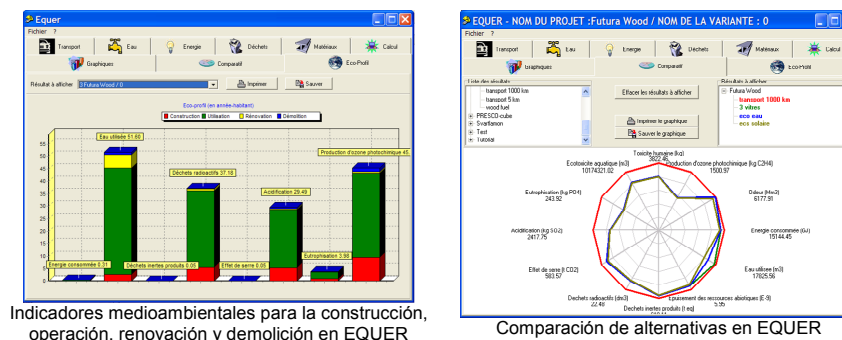


Figura 2.10. Resultados en EQUER

#### 2.7.2.4. Greencalc+

*GreenCalc* es una herramienta para evaluar y comparar la sostenibilidad medioambiental de los edificios. El método *GreenCalc* calcula, por medio de la metodología de ACV, cuánto costaría prevenir los daños medioambientales de la construcción y uso de los edificios. Los resultados no sólo se expresan en términos de efectos medioambientales, sino también de costes medioambientales, por lo que la evaluación se traduce en costes por metro cuadrado para el ciclo de vida completo del edificio: construcción, explotación y demolición. Para la evaluación de impactos, *Greencalc* utiliza principalmente la metodología *CML 2* complementada en algunos aspectos por el *Ecoindicador 99*.

*Greencalc* está compuesta por 4 módulos: materiales, energía, agua y movilidad. El módulo de materiales calcula el impacto medioambiental de los materiales utilizados (incluyendo el mantenimiento) durante la vida útil del edificio. Para ello utiliza el modelo *TWIN* desarrollado por el “*Dutch Institute for Building Biology and Ecology*” (*NIBE*) que combina datos cuantitativos disponibles de otros estudios de ACV con datos bibliográficos cualitativos.

El módulo de energía calcula el consumo de energía durante la vida útil del edificio. Este módulo engloba distintos parámetros: uso del edificio, sistemas de calefacción, refrigeración, ventilación y agua caliente, iluminación artificial, energía solar, etc. A partir de estos parámetros se obtiene el consumo de energía y un ratio del rendimiento energético del edificio.

El módulo de agua calcula el consumo de agua durante la vida útil del edificio, mientras que el módulo de movilidad calcula los costes medioambientales “ocultos” asociados a los desplazamientos producidos durante la vida útil del edificio. Este módulo incorpora diversos escenarios de movilidad que dependen de la ubicación del edificio, la facilidad de acceso mediante transporte público, las infraestructuras viarias existentes y el número de plazas de aparcamiento disponibles.

Todos los resultados de *Greencalc* pueden exportarse a *MS Excel* para su procesamiento posterior. Uno de los resultados a destacar es un índice medioambiental global del edificio (Crouwel M., 2008), que además puede desglosarse entre los cuatro módulos señalados anteriormente. Este índice medioambiental ha sido desarrollado por la Agencia Inmobiliaria Gubernamental Holandesa (RGD) con el fin de cuantificar en un número el nivel de sostenibilidad de un edificio. El índice toma 1990 como año de referencia, de modo que un edificio construido en 1990 tiene un índice medioambiental de 100. A partir de ahí, cuanto más alto es el nivel de sostenibilidad del edificio, más alto es el índice. El índice medioambiental ha sido calculado para más de un centenar de edificios, mayoritariamente para edificios comerciales o industriales, si bien el índice puede calcularse también para edificios residenciales.

El índice de la mayoría de los edificios está entre 100 y 200, alcanzando actualmente un valor de 250 en edificios innovadores. Suponiendo un crecimiento lineal de dicho índice entre 1990 y 2040, para alcanzar un “factor 20” en 2040, - factor definido por Barry Commoner, que conlleva que la eficiencia con que los recursos medioambientales se utilicen en el año 2040 debe ser 20 veces mayor a la del año 1990- , lo que supone un valor del índice de 2.000 en el año 2040, el índice actual de un edificio debería ser de 800.

La experiencia ha demostrado que para la consecución de un índice medioambiental de 2.000 además de hacer una selección de materiales respetuosos con el medioambiente e incorporar energías renovables en el edificio, hay que considerar otros aspectos como la multifuncionalidad de los espacios del edificio, la correcta ubicación del edificio minimizando las necesidades de movilidad y una larga vida útil prevista, eliminando cualquier escenario futuro de demolición del edificio.

#### **2.7.2.5.Eco-Quantum**

La herramienta *Eco-Quantum*, desarrollada en 2002 en Holanda por *IVAM-ER*, permite calcular de forma cuantitativa el comportamiento medioambiental de un edificio según la metodología de ACV.

A partir de los flujos energéticos y de materiales del edificio, *Eco-Quantum* calcula los impactos ambientales en base a 11 categorías de impacto, que posteriormente se agrupan en 4 marcadores medioambientales: recursos, emisiones, energía y residuos. En cada marcador se indica para cada una de las etapas del ciclo de vida del edificio, qué parte del impacto está relacionada con los materiales, la energía o el agua. Finalmente los resultados de los 4 marcadores medioambientales son agregados y ponderados para obtener un indicador medioambiental global del edificio, de gran utilidad para comparar distintos diseños de edificios.

Algunos inconvenientes de esta herramienta son que la base de datos de materiales no puede ser ampliada por el usuario y que su uso se limita a edificios residenciales. Asimismo, la gran cantidad de datos necesarios para hacer el análisis limita el uso de esta herramienta a las últimas fases del diseño de un edificio.

#### **2.7.2.6.Legep**

*LEGEP-Lebenszyklus Gebäude Planung*, (Kohler N., et al., 2005) es una herramienta desarrollada en Alemania por *LEGEP Software GmbH* para realizar análisis integrados de ciclo de vida como apoyo al diseño, construcción,

supervisión y evaluación de edificios nuevos o existentes y de materiales de construcción. *LEGEP* incluye una base de datos con la descripción de todos los elementos de un edificio (en base a la norma alemana DIN 276), sus costes de ciclo de vida (en base a la norma alemana DIN 18960 y al informe final “*Life Cycle Costs in Construction*” del *Task Group 4*). Toda la información se estructura a lo largo de las siguientes etapas del ciclo de vida del edificio: construcción, mantenimiento, funcionamiento, rehabilitación y demolición. *LEGEP* puede calcular la demanda y coste energético para calefacción, agua caliente sanitaria, equipos eléctricos, etc., los costes asociados a la construcción, operación (energía, limpieza, etc.), mantenimiento, rehabilitación y demolición, así como los impactos ambientales en base a la normativa ISO vigente.

En *LEGEP*, un edificio puede ser descrito utilizando elementos predefinidos o definiendo cada uno de los elementos desde cero. Cada elemento contiene todos los datos necesarios relativos a su coste, demanda energética, flujos de materiales e impactos ambientales. Los costes de los elementos se calculan a partir de la base de datos *SIRADOS*, que se publica anualmente y que engloba alrededor de 6.000 elementos. Los inventarios del ciclo de vida se basan en las bases de datos *Ecoinvent* (Suiza) y *Gemis* (Alemania), incluyendo algunos valores específicos de la “*Ökoinventare Baustoff*”.

El número de indicadores medioambientales mostrados para cada etapa del ciclo de vida puede seleccionarse de entre los indicadores del método *CML*, si bien actualmente se está en fase de implementación de otros indicadores como los *DALYs*.

#### **2.7.2.7.BeCost**

*BeCost* es una herramienta web fácil de usar desarrollada en Finlandia por *VTT* para realizar el ACV de un edificio. El programa incluye perfiles ambientales, costes económicos y gastos de mantenimiento de materiales de construcción producidos en Finlandia, diseños de soluciones constructivas para muros exteriores, tabiques, cubiertas y forjados, etc. *BeCost* calcula las cantidades utilizadas de materiales, y muestra el perfil ambiental (en forma de emisiones, consumo de energía y de materias primas) así como el coste de las soluciones constructivas seleccionadas y del edificio completo para la vida útil elegida por el usuario.

*BeCost* puede ser usado por los diseñadores de edificios para evaluar las repercusiones medioambientales de distintas soluciones constructivas y materiales, de las acciones de mantenimiento y reparación del edificio, y de la vida útil prevista para el edificio, así como para verificar el cumplimiento de las posibles especificaciones medioambientales existentes.

#### **2.7.2.8.Envest 2**

*Envest 2* es una herramienta web desarrollada en Reino Unido por *BRE* (*Building Research Establishment*) que simplifica el complejo proceso de diseño de edificios con bajo impacto ambiental y bajo coste de ciclo de vida. Por tanto, permite considerar en el diseño tanto los aspectos medioambientales como los económicos. La herramienta es de pago, si bien existe una versión de demostración.

Al introducir el diseño del edificio en la herramienta: altura, número de plantas, superficie acristalada, materiales seleccionados (para los muros exteriores,

cubiertas, forjados, etc.) y sistemas energéticos (calefacción, refrigeración, etc.), *Invest 2* identifica aquellos elementos que tienen mayor influencia en el impacto medioambiental del edificio y los costes de ciclo de vida, y muestra los efectos de seleccionar otros materiales y sistemas energéticos distintos. Todos los resultados detallados y resumidos de las distintas opciones de diseño pueden ser fácilmente transferidos a un informe editable.

*Invest 2* considera un total de 12 impactos medioambientales, que incluyen, entre otros, el cambio climático, el agotamiento del ozono estratosférico, la toxicidad humana, la eutrofización, la extracción de minerales, etc. Además para facilitar la comparación entre diseños se proporciona la puntuación única en ecopuntos. En cuanto a los costes, se miden en libras esterlinas según el valor actual neto, considerando una tasa de descuento editable por el usuario.

Existen dos versiones disponibles de las herramienta: “*Invest 2 estimator*” y “*Invest 2 calculator*”. La primera, considera valores medioambientales y financieros por defecto para el ciclo de vida del edificio, por lo que permite a los diseñadores hacer una estimación de los costes del ciclo de vida de distintos diseños, mientras que la segunda, permite al usuario personalizar los datos financieros.

#### **2.7.2.9.Athena**

*Athena* es una aplicación de fácil manejo, desarrollada por el “*Athena Sustainable Materials Institute*” de Canadá, para llevar a cabo estudios de ACV en edificios. La herramienta permite a los arquitectos e ingenieros evaluar y comparar diversos diseños de edificios y materiales seleccionados en las fases de diseño preliminar del edificio. El diseño conceptual del edificio se puede ir introduciendo utilizando diversas soluciones constructivas predefinidas. La base de datos contiene inventarios de América del Norte (principalmente de Canadá) relativos a montajes estructurales y materiales para la envolvente del edificio. El mantenimiento de las soluciones constructivas así como la energía consumida en la fase de operación del edificio también se considera a partir de una vida útil del edificio definida por el usuario. Los resultados se pueden presentar por cada etapa del ciclo de vida o por cada solución constructiva, en términos de energía primaria, potencial de calentamiento global, residuos sólidos, emisiones al aire, vertidos al agua, y uso de recursos naturales.

#### **2.7.2.10.Beas**

*BEES (Building for Environmental and Economic Sustainability)* es una aplicación de ACV especializada en productos de la construcción, desarrollada por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de Estados Unidos (*National Institute of Standards and Technology - NIST*). *BEES* es una herramienta sencilla dirigida a diseñadores, constructores y fabricantes de productos que dispone de una base de datos con más de 230 productos de la construcción. La herramienta permite realizar comparaciones entre productos basadas en ACV y ACCV. Los comportamientos en términos económicos y medioambientales se combinan en una sola puntuación según los factores de ponderación especificados por el usuario. La versión 4.0 de esta herramienta puede descargarse de forma gratuita, previo registro.



### 2.7.2.11.LTE-OGIP

*LTE-OGIP (Optimization of Global demands in terms of costs, energy and environment, within an Integrated Planning Process)* es una herramienta basada en la metodología de ACV que permite optimizar los costes, energía e impactos medioambientales de un edificio. *LTE-OGIP* ofrece un procedimiento estándar desarrollado por el *Swiss Research Centre for Rationalization in Building and Civil Engineering (CRB)* para determinar los impactos medioambientales del proceso de construcción y de la operación de un edificio, y calcula los costes y el consumo de energía en su funcionamiento. *LTE-OGIP* permite una estimación temprana del coste del edificio basada en elementos constructivos tales como los muros externos, cubiertas, ventanas, etc., que resulta mucho más precisa que una estimación basada en los costes por metro cúbico.

La herramienta utiliza en la evaluación, resultados del ciclo de vida de alrededor de 2.500 elementos constructivos obtenidos esencialmente a partir de la base de datos *Ecoinvent v1.1*. Las principales metodologías de evaluación de impacto incluidas son la demanda de energía acumulada, el potencial de calentamiento global, el *Ecoindicador 99* y los *Ecopuntos*.

Las principales cualidades de *LTE-OGIP* son la estructura de datos transparente y la accesibilidad del usuario a los datos, permitiéndole añadir nuevos datos.

### 2.7.2.12.Jomar

*JOMAR* (Rønning A., et al., 2007) es un modelo desarrollado para el cálculo del perfil medioambiental de los edificios, a partir de datos procedentes de bases de datos y herramientas generales de ACV y ACCV de los países nórdicos de Europa. Los consumos totales de energía así como los costes y las emisiones que contribuyen al cambio climático se calculan para las siguientes etapas de la vida útil del edificio: construcción, operación, mantenimiento, desarrollo y fin de vida.

El modelo *JOMAR* ha sido probado en construcciones flexibles, pesadas y basadas en madera. Los resultados demuestran que la fase de operación conlleva las mayores cargas medioambientales. El modelo sigue aún en desarrollo, y actualmente no existe una herramienta software que lo implemente.

## 2.8.Oportunidades del uso del análisis de ciclo de vida en el sector de la edificación

La aplicación de la metodología de ACV en edificios conlleva innumerables oportunidades (Ortiz O., et al., 2009b) para el sector de la construcción: facilita la toma de decisiones por parte de las empresas de la construcción, organizaciones gubernamentales y no gubernamentales con vistas a la planificación de estrategias de ecoeficiencia en la edificación, la identificación de oportunidades para mejorar los impactos medioambientales en el sector de la construcción considerando el ciclo de vida completo de los edificios, el establecimiento de prioridades para el diseño ecológico o la eco-rehabilitación de edificios, la selección adecuada de proveedores de materiales constructivos y equipos energéticos, el establecimiento de estrategias y políticas fiscales para gestionar los residuos de la construcción y el transporte de materiales, la definición de nuevos programas de I+D+i, etc.

Los potenciales usuarios del ACV en el sector de la edificación son consultores, arquitectos, ingenieros, gestores energéticos de la administración local y autonómica, planificadores urbanísticos y promotores inmobiliarios.

Tipo de usuario	Fase del proceso de construcción	Propósito del ACV
Planificadores urbanísticos y asesores municipales	Fases preliminares	Establecimiento de objetivos a nivel municipal. Definición de las zonas para la promoción o prohibición de edificios residenciales y terciarios (Planes Generales de Ordenación Urbana). Establecimiento de objetivos para las zonas a desarrollar.
Promotores inmobiliarios y clientes		Elección del emplazamiento del edificio. Dimensionamiento del proyecto. Establecimiento de objetivos medioambientales para el edificio dentro de un Programa determinado.
Arquitectos	Primeros diseños y diseños detallados de nuevos edificios, en colaboración con ingenieros. Diseño de proyectos de rehabilitación.	Comparación de opciones de diseño (geometría/orientación, opciones técnicas)
Ingenieros / Consultores	Primeros diseños y diseños detallados de nuevos edificios, en colaboración con arquitectos. Diseño de proyectos de rehabilitación.	

Tabla 2.17. Usuarios de ACV para edificios

Los estudios de ACV analizan la influencia de todas las variables que intervienen en el ciclo de vida del edificio y posibilitan las comparaciones del impacto medioambiental de edificios ubicados en diferentes zonas geográficas, con distintos usos. Asimismo pueden facilitar la consecución de un etiquetado medioambiental de los edificios, que dependiendo de las políticas nacionales o regionales, podría permitir la obtención de ayudas y subvenciones, así como posibles reducciones de las tasas e impuestos, como consecuencia directa de la reducción del impacto ambiental.

Un estudio de ACV permite evaluar la influencia que tienen las principales decisiones adoptadas en la fase de diseño del edificio sobre el mantenimiento y los gastos asociados al funcionamiento, así como los impactos medioambientales reales del edificio. De este modo es posible evaluar el potencial de ahorro energético y disminución de emisiones asociadas a la implantación de distintas soluciones constructivas y arquitectónicas de bajo impacto a nivel local, regional y global.

Mediante la combinación del ACV con el ACCV (Gluch P., Baumann H., 2004; Langdon D., 2007), se obtiene una mayor rentabilidad económica de las inversiones relacionadas con la edificación, contribuyendo a una mejora de la gestión energética de los edificios. Esta combinación puede, por ejemplo, ser utilizada para la selección de soluciones constructivas alternativas, identificando la solución técnica que cumple con un objetivo medioambiental establecido con el menor coste, o la contabilización del impacto medioambiental en dicho coste (Zabalza I., et al., 2008a).

Asimismo el uso del ACV ayuda a promover la construcción de Edificios de Cero Emisiones de Ciclo de Vida (*LC-ZEB*) con un nulo impacto medioambiental, integrando técnicas avanzadas de ecodiseño arquitectónico, bioconstrucción, ahorro energético, agua y materiales, y energías renovables, obteniendo la máxima eficiencia de los recursos disponibles y el máximo confort térmico.

No obstante, en la actualidad, existen diversas barreras y obstáculos (Brick K., 2008) a superar para conseguir una mayor aplicación del ACV en los edificios, entre los que cabe citar, los prejuicios existentes acerca de la complejidad del ACV y la precisión de sus resultados en función de las bases de datos o las aplicaciones informáticas utilizadas, las dificultades en la comprensión y aplicación de los resultados del ACV debido al escaso conocimiento de la metodología del ACV entre los agentes del sector de la construcción -arquitectos, ingenieros, urbanistas, promotores inmobiliarios y usuarios-, así como la escasa comunicación existente entre las entidades desarrolladores de aplicaciones informáticas y sus potenciales clientes.

Para superar algunas de estas barreras sería necesario la adaptación de las bases de datos del inventario existentes para los procesos de construcción y materiales, y la armonización de las metodologías de evaluación de impacto a los aspectos específicos del sector de la construcción en cada país.

Pero, seguramente la barrera más importante para un uso extendido del ACV en la edificación es la falta de exigencias legislativas y la falta de incentivos, que conlleva una baja demanda para la realización de estudios de ACV en edificios. Por ejemplo, en la actualidad no existe prácticamente ningún vínculo entre el ACV y los procedimientos de certificación energética que se han implementado en Europa (García Casals X., 2006) durante estos últimos años. Por ello, en algunos casos se puede dar la contradicción de obtener una mejor calificación energética, a pesar de inducir un mayor consumo de energía primaria en términos globales, ya que la energía incorporada en los materiales de construcción no se considera en la certificación energética. La incorporación del ACV en los actuales procedimientos de certificación energética de edificios permitiría mejorar dichos procedimientos valorando la energía incorporada en los materiales de la construcción, el impacto de los transportes asociados y la disposición final de los materiales, obteniendo una mejor aproximación al impacto medioambiental real del edificio, y promoviendo la construcción sostenible de ecoedificios y la innovación en el sector de la construcción.

### **2.8.1.El ACV y el sector de la edificación en España**

En la actualidad, la legislación nacional no establece requisitos a cumplir relativos al ACV en edificios. Tampoco existen, más que ocasionalmente, ayudas económicas para su puesta en práctica. Únicamente se puede exigir algún criterio relacionado con la aplicación del *“life cycle thinking”* en edificios muy específicos, como por ejemplo, edificios demostrativos, edificios piloto en el marco de proyectos de I+D+i, ecobarrios o ecociudades, edificios representativos como las sedes de grandes compañías, etc.

En general, todos los aspectos relacionados con el ACV se perciben como complicados por los agentes del sector de la construcción. Existen dificultades en la comprensión de las implicaciones de las declaraciones ambientales de producto,

debido al escaso conocimiento de la metodología de ACV y, en general, de las metodologías de evaluación de impacto medioambiental.

A modo de ejemplo, dentro de las “*Actuaciones de Formación y Divulgación en Materia de Ahorro y Eficiencia Energética*” correspondientes al Plan de Acción 2008-2012 de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España (PAE4+) en el ámbito territorial de la Comunidad Autónoma de Aragón en 2008, la Fundación CIRCE organizó diversas Jornadas Informativas dirigidas a los Colegios Profesionales de Ingeniería, Ingeniería Técnica, Arquitectura y Arquitectura Técnica de Aragón, en las que por medio de una encuesta se sondeó el grado de conocimiento del ACV aplicado a edificios. Entre los meses de octubre de 2008 y julio de 2009 se recopilaron un total de 193 encuestas cumplimentadas válidas. Los resultados indican que sólo un 33% de los encuestados conoce el concepto de ACV de un edificio y únicamente un 7% tiene conocimiento de alguna herramienta o metodología de ACV, existiendo diferencias muy poco significativas entre los distintos Colegios Profesionales, lo que revela que existe un desconocimiento generalizado al respecto.

Además, el intenso desarrollo de nueva normativa sobre eficiencia energética edificatoria que se ha producido en España durante los últimos años hace que los distintos agentes involucrados se quejen de falta de tiempo para adaptarse a la nueva legislación y aplicar todos los nuevos requisitos normativos. Hay que destacar que como resultado de la transposición de la Directiva 2002/91/CE, en los últimos años se ha promulgado un nuevo Código Técnico de la Edificación (Real Decreto 314/2006), un nuevo Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (Real Decreto 1027/2007) y un procedimiento de Certificación Energética para Edificios nuevos (Real Decreto 47/2007). Hay que añadir que en 2010 se promulga un nuevo procedimiento de certificación energética para edificios existentes.

En este sentido, las herramientas de ACV podrían ser un excelente complemento de los procedimientos actuales de certificación energética de edificios para obtener una contabilidad real de la energía y emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al edificio, incorporando las etapas de producción de materiales, transporte y disposición final. Dichas etapas no se consideran en los actuales procedimientos de certificación. El uso de herramientas de ACV produciría una mejora de la eficiencia energética del sector de la construcción en términos globales. Además de mejorar la eficiencia energética de los edificios, permitiría la mejora del perfil medioambiental de los materiales de construcción y promovería la reutilización y/o reciclaje de dichos materiales. Por todo lo anterior, sería necesaria la integración del ACV en la revisión de la Directiva Europea de Eficiencia Energética de Edificios para que, de este modo, sea considerado en los procedimientos de certificación energética de cada país.

En relación con la durabilidad de los materiales de construcción, el Código Técnico de la Edificación establece regulaciones sobre el mantenimiento de las distintas partes, sistemas constructivos o materiales de los edificios. Por ejemplo, la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) establece la durabilidad, en función del tipo de estructura y el uso a que será sometido, que se alcanzará a través del seguimiento de sus exigencias. No obstante, sería necesario el desarrollo de nueva normativa que cubra el actual vacío legal existente relacionado con la facilidad de desensamblaje de los materiales de los edificios y el impacto del transporte de los materiales; ya que estos aspectos no suelen valorarse casi nunca en los actuales proyectos de edificación.

Cabe destacar que en Cataluña, el Decreto 21/2006 (conocido como Decreto de Ecoeficiencia) regula la adopción de algunos criterios ambientales y de ecoeficiencia en los edificios. Este Decreto obliga a los edificios nuevos o a rehabilitar ubicados en Cataluña a implementar una serie de medidas de mejora medioambiental y elegir voluntariamente un número suficiente de actuaciones para obtener un “mínimo de puntos ambientales”. En lo relativo al agua, se exige la separación de las aguas pluviales de las grises y negras en el interior del edificio, la limitación del caudal máximo en grifos y la incorporación de temporizadores en grifos de edificios públicos. En relación con la energía, se exige limitar el máximo coeficiente de transmisión térmica de las fachadas (parte opaca incluyendo puentes térmicos superficiales) y huecos a 0,7 y 3,3 W/m<sup>2</sup>K respectivamente. En relación con los residuos, hay que prever en el proyecto del edificio espacios para la recogida selectiva de basuras y cuantificar, clasificar y valorar los residuos producidos durante el proceso de ejecución o derribo de la obra. Asimismo hay que incorporar para al menos una familia de productos del edificio su declaración o certificación ambiental.

Aunque no son específicas sobre edificación, existen actualmente en España 2 Redes Temáticas relacionadas con el ACV, cuyo objetivo es facilitar la puesta en contacto e intercambio de opiniones e investigaciones, en un marco de colaboración entre organismos, instituciones y empresas interesadas en el conocimiento y aplicación del ACV: “Red Temática de Análisis de Ciclo de Vida Española” <[www.usc.es/biogrup/redciclovida.htm](http://www.usc.es/biogrup/redciclovida.htm)> coordinada por el profesor Gumersindo Feijoo, y “Xarxa Catalana d'Anàlisi del Cicle de Vida” <[www.acv.cat](http://www.acv.cat)>, coordinada por el profesor Joan Rieradevall.

En España existen un buen número de universidades, grupos y centros de investigación con experiencia en ACV y edificación, entre los que cabe destacar: Escuela Superior de Comercio Internacional (GiGa-ESCI) de la Universitat Pompeu Fabra, Escuela Técnica Superior de Arquitectura y Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad Politécnica de Madrid, Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona de la Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Química de la Universitat Rovira i Virgili, Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya (ITeC), Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals de la Universitat Autònoma de Barcelona, Centro Tecnológico de la Construcción (i-MAT), Fundación CIDEMCO, Fundación CIRCE, etc.

Hay que señalar que en 2010, dentro del Plan Nacional de Investigación Científica Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011 del Ministerio de Ciencia e Innovación, se han puesto en marcha dos proyectos nacionales de I+D+i con objeto de avanzar en el conocimiento del ACV en la edificación: el Proyecto Singular Estratégico (PSE) del Programa Nacional de Cooperación Público Privada “*CICLOPE: Análisis del impacto ambiental de los edificios a lo largo de su ciclo de vida en términos cuantificables de consumo energético y emisiones de gases de efecto invernadero asociadas*” liderado por Fundación CIDEMCO, y el Proyecto Coordinado de Investigación Fundamental no orientada “*ACV-EDIF: Desarrollo de nuevas metodologías para la evaluación cuantitativa del impacto medioambiental de edificios basadas en el análisis de ciclo de vida*”, liderado por Fundación CIRCE.

## 2.9. Conclusiones

---

En el contexto actual, la competencia entre las empresas del sector de la construcción va a ser cada vez mayor. Por ello, la minimización de costes asociada a la aplicación de medidas que mejoren la ecoeficiencia de los edificios, disminuyendo los consumos de energía y materias primas, reduciendo las necesidades de transporte y aumentando el reciclaje de los materiales, debe contemplarse más como una necesidad que como una opción. El respeto por el medioambiente es cada vez más valorado por los usuarios, por lo que las empresas del sector deben empezar ya a modificar sus estrategias, con el objetivo de llegar a ofrecer a los usuarios, edificios que sean neutros o incluso puedan llegar a tener un impacto positivo sobre el medioambiente. En este sentido, el ACV es una herramienta versátil y útil para disminuir los consumos energéticos y emisiones de GEI del sector de la construcción y establecer las estrategias de mejora medioambiental más adecuadas desde una perspectiva global.

El ACV permite dar una respuesta clara para cada edificio particular, a cuestiones tales como: ¿cuál es la mejor combinación de materiales de construcción para la fachada?, ¿qué estructura es más respetuosa con el medioambiente?, ¿qué fuentes energéticas son las más adecuadas?, ¿cuál es el espesor de aislamiento óptimo?, ¿en cuánto se reduce el impacto medioambiental al instalar sistemas renovables como captadores solares térmicos, paneles fotovoltaicos, calderas de biomasa o aerogeneradores de pequeña potencia?, ¿cómo repercute la posibilidad de reciclado de una determinada solución constructiva?, ¿cuál es el impacto asociado a la movilidad de los ocupantes del edificio y a las infraestructuras de suministro de energía y agua necesarias?, ¿qué objetivos medioambientales es posible plantear para el edificio? y ¿cuál es el grado de cumplimiento de dichos objetivos medioambientales?.

A pesar de que existen estudios de ACV de productos industriales desde hace más de 40 años, su aplicación al sector de la edificación es relativamente reciente y requiere de un esfuerzo investigador para la correcta adaptación y simplificación de la metodología que garantice su uso generalizado por parte de los agentes del sector. En general, la aplicación del ACV en el sector de la edificación, dadas sus especiales características que lo diferencian significativamente de otras industrias, conlleva cierta dificultad técnica con respecto a otros sistemas más sencillos, como por ejemplo, la fabricación de productos y componentes, que tienen lugar en un entorno más controlado, en el que se dispone de más información.

Además conviene reseñar que hay numerosos aspectos metodológicos sobre los cuales no existe un consenso científico total y en los que hay que seguir trabajando, como por ejemplo, la transparencia, homogeneidad y calidad de las fuentes de datos utilizados en el inventario del ciclo de vida, que pueden provenir de bases de datos o de declaraciones ambientales de productos; la idoneidad de los indicadores utilizados y su ponderación en las distintas metodologías de evaluación de impactos, el modo de contabilización de los recursos energéticos y minerales, la incertidumbre de los escenarios futuros de gestión de residuos, etc.

La selección de los indicadores de las categorías de impacto a evaluar en esta tesis, se ha realizado considerando los intereses y prioridades actuales a nivel europeo e internacional de reducción del consumo energético y las emisiones de GEI. En consecuencia, los principales indicadores seleccionados para esta tesis son la demanda de energía primaria acumulada y la huella de carbono, a los que se añaden la huella hídrica, debido a su creciente importancia en países como España,

y la puntuación única del método *Ecoindicador 99*, ya que aglutina indicadores energéticos y ambientales proporcionando una evaluación más completa del impacto. En todo caso, cabe destacar que el carácter horizontal de la metodología que se va a seguir garantiza su aplicación para la evaluación de otras categorías de impacto que requieran ser consideradas en un futuro.

Respecto a las aplicaciones específicas de ACV para edificios, hay que destacar la dificultad existente a la hora de comparar los resultados obtenidos en las distintas aplicaciones, al establecer límites e hipótesis de partida muy distintas, que además no son modificables en gran parte de las aplicaciones. Por ello, es necesario avanzar en el establecimiento de criterios homogéneos que garanticen la obtención de resultados comparables.

Otra debilidad de la mayor parte de herramientas es la falta de vínculos con los programas de simulación térmica dinámica y los programas CAD, lo que aumenta considerablemente el tiempo necesario para realizar el ACV de un edificio y dificulta su uso extendido entre los agentes del sector de la edificación. Asimismo se ha detectado no se ha detectado la existencia de herramientas gratuitas que combinen a la vez información completa y transparente sobre aspectos energéticos, ambientales y económicos de ciclo de vida de los edificios aplicable al contexto español.

Con objeto de no establecer hipótesis de partida y simplificaciones predefinidas y cerradas, en esta tesis se va a utilizar una aplicación general de ACV: *SimaPro v7.1.8*, que permite evaluar las categorías de impacto seleccionadas, utilizando datos de inventario modificables procedentes de diversas bases de datos, como *Ecoinvent*, *IVAM* e *IDEMAT*, que serán las principales fuentes de datos de esta tesis, debido a su mayor calidad y transparencia.

En España, los estudios de ACV a nivel de edificios se desarrollan de forma incipiente y en casos muy puntuales principalmente por centros de I+D y universidades así como por algunas consultoras especializadas. Solamente en edificios muy específicos, una empresa o una autoridad local, como por ejemplo un Ayuntamiento, puede requerir el desarrollo de un estudio de ACV. En dichos casos, este tipo de estudios no es desarrollado por el proyectista del edificio (arquitecto o ingeniero), sino que es subcontratado habitualmente a un consultor especializado o a un centro de I+D. Por otra parte, a nivel de producto, el ACV es utilizado muy ocasionalmente, por las empresas fabricantes de materiales constructivos, en la elaboración de sus declaraciones ambientales de producto y otras informaciones.

Las principales barreras para una mayor implantación del ACV en el sector de la edificación en España son técnicas, asociadas a la disponibilidad de herramientas y bases de datos adecuadas al sector; formativas, asociadas a la disponibilidad de un cuerpo técnico suficientemente capacitado, experto y extendido en el territorio; y económicas, asociadas al alto coste de implantación del ACV en la edificación, ya sea por la falta de herramientas e información, por la falta de personal cualificado, o por la cantidad de tiempo que supone la realización de este tipo de estudios.

Por ello, las principales acciones que tendrían que ponerse en marcha para superar las barreras anteriores son: formación y concienciación general sobre la importancia del ACV dirigida a todos los agentes del sector, apoyo económico a la realización de estudios y proyectos, ofrecimiento de información sintetizada y de sencilla puesta en práctica extraída de estudios de ACV como ayuda al proyecto de

edificios de obra nueva y rehabilitación, y establecimiento de requerimientos normativos relativos a la consideración de los impactos ambientales en la totalidad del ciclo de vida de los edificios, y no sólo en la fase de uso, como sucede actualmente.

De todas estas acciones, y teniendo en cuenta el escaso conocimiento actual de la metodología, la formación debería ser una prioridad. Para ello, habría que desarrollar manuales y directrices simplificadas y consensuadas por la comunidad científica para facilitar el uso del ACV entre todos los agentes del sector de la construcción (arquitectos, ingenieros, planificadores urbanísticos, promotores, consumidores, etc.) y promover campañas de concienciación a distintos niveles dirigidas a todos los agentes sobre la aplicación del ACV en la edificación, donde se mostrara claramente la repercusión que tiene el diseño del edificio en el consumo energético, y, por tanto, en el coste operacional que se produce a lo largo de toda su vida útil. Esto permitiría poner en valor dicha metodología, lo que propiciaría un uso más extendido.

Los resultados de esta tesis permitirán avanzar en esta dirección, caracterizando energética y ambientalmente los distintos productos de la construcción, estableciendo una metodología de análisis de ciclo de vida aplicable a edificios y evaluando las medidas específicas para la mejora de la ecoeficiencia tanto a nivel de producto, como a nivel de edificio.



## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Tradicionalmente en el sector de la construcción se han utilizado materiales de carácter local tales como el adobe, la piedra, la madera, el corcho, etc., lo que se traducía en unos costes energéticos e impactos ambientales reducidos. En la actualidad, el uso masivo de materiales de carácter global como el cemento, el acero, el aluminio, el PVC y otros plásticos, etc., ha causado un incremento notable en los costes energéticos y medioambientales.

Según el World Watch Institute, la construcción de obra civil y edificación consumen a escala mundial el 60% de las extracciones de materias primas de la litosfera. De ese volumen, la edificación representa el 40%, por lo que globalmente ésta supone el 24% de las extracciones (Wadel G., 2009). En Europa, las extracciones minerales per cápita destinadas a la edificación ascienden a 4,8 toneladas por habitante y año (Wadel G., 2009), lo que supone 64 veces el peso promedio de una persona, y pone de manifiesto la necesidad de avanzar hacia la desmaterialización en la edificación. Además, por término medio, cada metro cuadrado construido conlleva una emisión de 1,5 toneladas equivalentes de dióxido de carbono durante su vida útil (cantidad variable en función del diseño del edificio).

En la actualidad, el uso masivo de materiales de carácter global como el cemento, el aluminio, el hormigón, el PVC, etc., ha causado un incremento notable en los costes energéticos y medioambientales. A esto hay que añadir, que frecuentemente, la selección de los materiales de construcción para los edificios se realiza sin tener en cuenta la climatología local, lo que repercute en una mayor demanda energética y consecuentemente conlleva mayores emisiones en el uso y mantenimiento del edificio. Por ello, hay que considerar siempre que existe una interacción entre todas las etapas de la vida de un edificio: producción, construcción, uso y mantenimiento, y disposición final del edificio. De este modo, una reducción de la inversión en la etapa de producción (por ejemplo, disminuyendo el espesor de aislamiento térmico) conlleva un aumento de la inversión en las etapas de uso y mantenimiento del edificio.

El enfoque de ciclo de vida debe ayudar a la toma de decisiones informadas a la hora de escoger las mejores tecnologías disponibles y minimizar desde su diseño o su rehabilitación el impacto ambiental de los edificios. A menudo, determinados materiales y soluciones constructivas se presentan como “ecológicas” porque mejoran aspectos ambientales muy concretos en determinadas etapas del ciclo de vida de los edificios –como puede ser su fabricación. Sin embargo, cuando son analizadas de un modo más integrado y se consideran otras etapas del ciclo de vida–como su mantenimiento o disposición final–, estas soluciones pierden sus ventajas en comparación con otras. Del mismo modo, productos que se presentan como baratos a medio plazo, pueden tener elevados costes de mantenimiento o de gestión de residuos; o productos altamente tecnológicos, tienen costes productivos muy elevados que no llegan a amortizarse.

Por el contrario, también puede suceder que al considerar todo el ciclo de vida, materiales con importantes emisiones de CO<sub>2</sub> como el hormigón, pueden contribuir a disminuir sus emisiones al darles una segunda vida, como, por ejemplo, relleno de infraestructuras, con un doble efecto: la disminución de emisiones de CO<sub>2</sub> para obtener rellenos procedentes de canteras y la absorción de CO<sub>2</sub> debido a los procesos de recarbonatación.

Valero y Naredo propusieron la “Regla del Notario” (Naredo J.M.; Valero A.; 1998) que demuestra el desacoplamiento entre los costes termodinámicos y los costes termoeconómicos. De este modo, la fabricación, transporte e instalación en un edificio de materiales como el acero, el hormigón o el vidrio requiere de una gran cantidad de energía, a pesar de que en el conjunto del edificio representan una mínima parte del coste final. Esta situación podría corregirse mediante un nuevo sistema impositivo focalizado sobre el uso de los recursos naturales en vez de sobre el trabajo de las personas, aproximando los precios de aquellos materiales con altas necesidades de recursos a su coste energético real (Valero A., 1994).

Por todo ello, es fundamental aplicar la visión de ciclo de vida y tener en cuenta tanto los costes económicos como los ambientales a la hora de identificar las tecnologías más ecoeficientes.

Cada metro cuadrado habitable construido de un edificio convencional requiere de un total de 2,3 toneladas de más de 100 tipos de materiales distintos. Si se considera además el peso de los recursos afectados por el proceso de fabricación, la cifra anterior se multiplica por 3, ascendiendo hasta 6 t/m<sup>2</sup> (Wadel G., 2009).

La energía incorporada en diversos materiales de construcción (Vázquez M., 2001) ha sido estudiada desde hace varios años resaltando la importancia del uso de materiales reciclados (Janssen G.M.T., Hendriks Ch.F., 2002), tanto metales como vidrios y plásticos, y de los materiales de origen biosférico y renovables, dado su menor cantidad de energía incorporada siempre que los requerimientos de calidad lo permitan.

Más recientemente, se ha realizado un estudio sobre 60 edificios (Sartori I., Hestnes A.G., 2007) determinando que la proporción de energía incorporada en los materiales utilizados en la construcción bajo la óptica del ciclo de vida oscilaba entre el 9% y el 46% del total de la energía empleada en la vida útil del edificio, cuando se trataba de construcciones con un índice bajo de consumo de energía (buenos aislamientos, orientaciones adecuadas, aprovechamientos pasivos, etc.) y entre el 2 y el 38% en edificios convencionales. El amplio abanico de los resultados obtenidos se debe al tamaño de la muestra (60 edificios) y a la variedad de tipologías de construcción, materiales y condiciones climáticas escogidas.

A la hora de realizar un análisis de ciclo de vida de materiales de construcción pueden considerarse diferentes aproximaciones y simplificaciones (Kellenberger D., Althaus H.J., 2009) Algunos estudios (Cuchí A., Wadel G., Lopez F., Sagrera A., 2007) afirman que la fabricación de los materiales precisos para construir un metro cuadrado de una edificación estándar puede suponer la inversión de una cantidad de energía equivalente a la producida por la combustión de más de 150 litros de gasolina. Cada metro cuadrado construido conllevaría una emisión media de 0,5 toneladas de dióxido de carbono y un consumo energético de 5.754 MJ (que variaría en función del diseño del edificio) considerando solamente el impacto asociado a los materiales.

Las siguientes figuras muestran la contribución relativa de los principales materiales de construcción en la energía incorporada y las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a un metro cuadrado de un bloque de viviendas estándar, donde destaca el alto impacto de materiales comúnmente usados en los edificios como el acero, el cemento o la cerámica.

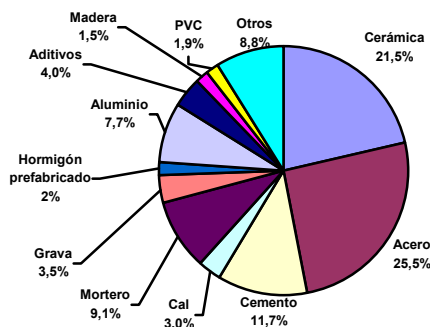


Figura 3.1. Contribución de los materiales necesarios para la construcción de 1 m<sup>2</sup> sobre la energía incorporada para su fabricación. Fuente: (Cuchi A., Wadel G., Lopez F., Sagrera A., 2007)

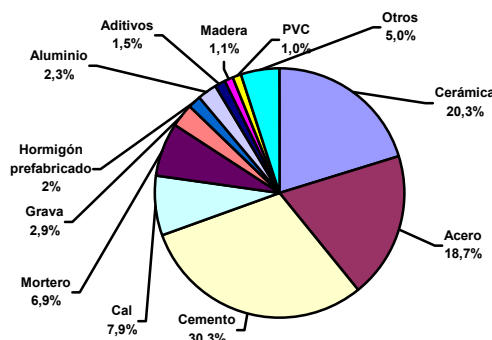


Figura 3.2. Contribución de los materiales necesarios para la construcción de 1 m<sup>2</sup> sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a su fabricación. Fuente: (Cuchi A., Wadel G., Lopez F., Sagrera A., 2007)

El objetivo de este capítulo es evaluar, en base a la metodología de análisis de ciclo de vida, el alto impacto en términos energéticos y medioambientales de los materiales de construcción más utilizados actualmente en el sector de la edificación en comparación con el reducido impacto de diversos eco-materiales, proponiendo y valorando, siempre que sea posible, medidas específicas para la reducción de dichos impactos en todas las etapas del producto: fabricación, transporte y disposición final. Las mejoras propuestas en la etapa de fabricación se apoyan en los Documentos BREF (Bat Reference Document Ef) de Referencia sobre las Mejores Técnicas Disponibles para la eficiencia energética, y para los distintos sectores a analizar (cerámico, cemento, polímeros, acero, etc.). Se obtendrá asimismo una primera aproximación a las curvas Ahorro-Inversión (Valero A., 1982) de los sectores industriales a los que pertenecen los materiales analizados.

Se pretende, por tanto, profundizar en el conocimiento de las especificaciones energéticas y medioambientales de los materiales de construcción, proporcionando pautas para la selección de materiales que permitan establecer, en próximos

capítulos, las estrategias más adecuadas para el ecodiseño de nuevos edificios, así como la rehabilitación de edificios ya existentes.

### **3.1. Metodología**

---

En esta sección se describe la metodología de análisis de ciclo de vida aplicada al conjunto de materiales de construcción analizados, así como el modelo de curvas Ahorro–Inversión a calcular para cada sector analizado. Tal como se justificó en el capítulo 2, se opta por un ACV con enfoque estático y atributivo.

#### **3.1.1. Unidad funcional**

La unidad funcional seleccionada es 1 kg de material y las etapas consideradas son la fabricación del material, su transporte desde la planta de producción hasta la obra, los posibles materiales auxiliares necesarios para fijar el material analizado en el edificio, y la demolición y disposición final del material.

Cabe destacar que los impactos obtenidos podrían ser comparativamente distintos al tomar 1 metro cúbico de material como unidad funcional, aumentando el impacto a medida que el material considerado tiene una mayor densidad.

#### **3.1.2. Categorías de impacto**

La selección de las categorías de impacto a analizar en este estudio se realiza considerando la actual problemática energética y medioambiental en el ámbito europeo. En este sentido conviene recordar los objetivos establecidos por la Unión Europea para el año 2020: reducción de las emisiones en al menos el 20% respecto a los niveles de 1990, ahorro energético del 20% respecto del consumo del año 2005 y aumento de la participación de las energías renovables en el consumo de energía primaria, desde el 7% actual al 20% en 2020 (Commission of the European Communities, 2007).

Por tanto, se seleccionan como categorías de impacto la energía incorporada (expresada en megajulios equivalentes: MJ-Eq) calculada a partir de la metodología de evaluación de impactos “Cumulative Energy Demand (CED)” y el potencial de calentamiento global (expresado en kilogramos de dióxido de carbono equivalentes: kg CO<sub>2</sub>-Eq) calculado a partir de la metodología del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPPC). Además para valorar otros aspectos medioambientales, se seleccionan también la huella hídrica (expresada en litros de agua) y la puntuación total (expresada en puntos: Pt) calculada a partir del método Ecoindicador '99 (Goedkoop M., Spriensma R., 2000).

#### **3.1.3. Metodologías de evaluación de impacto**

La metodología CED proporciona la demanda energética total, expresada en términos de energía primaria, asociada al ciclo de vida completo de un producto o servicio. La metodología distingue entre energía primaria renovable (hidráulica, biomasa, eólica, solar y geotérmica) y energía primaria no renovable (de origen fósil y nuclear). Para este estudio se ha utilizado la versión 1.05 del método CED implementada en la aplicación *SimaPro v 7.1.8*.

El efecto invernadero de origen antropogénico producido por las emisiones asociadas a las actividades humanas puede expresarse en términos de su potencial de calentamiento global en emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes. Para este estudio se ha utilizado la versión 1.01 del método de cálculo del potencial de calentamiento global implementada en la aplicación *SimaPro v 7.1.8* sobre la base de los factores de caracterización para 2007 del IPCC, y teniendo en cuenta un horizonte temporal de 100 años.

Ante la ausencia de una metodología específica que calcule la huella hídrica, su evaluación se ha realizado a partir de los correspondientes inventarios del ciclo de vida, agregando todas las extracciones de agua dulce procedentes de ríos, lagos y pozos, incluyendo el agua utilizada en procesos de enfriamiento, y excluyendo las extracciones de agua de origen marino u oceánico, así como el agua utilizada en turbinas hidráulicas para la producción eléctrica.

La metodología Ecoindicador '99 evalúa el impacto por medio de un indicador de puntuación total, desagregado en distintas categorías de impacto y de daños. En este estudio se ha utilizado la versión 2.06 del Ecoindicador'99 implementada en la aplicación *SimaPro v 7.1.8*, realizando la ponderación de las distintas categorías según el enfoque jerárquico, que cuenta con un mayor consenso entre la comunidad científica.

### 3.1.4. Bases de datos y requisitos de calidad de datos

En cuanto a los requisitos de calidad de datos, se han seleccionado los inventarios existentes en la base de datos *Ecoinvent v2.0* (Frischknecht R., et al., 2005; Kellenberger D., et al., 2007), que contiene un amplio número de materiales de construcción clasificados como aglutinantes, bituminosos, ladrillos, revestimientos y cubrimientos, hormigones, puertas y ventanas, aislantes, sellados, metales, maderas, plásticos, etc.

Todos los inventarios utilizados han sido previamente modificados para adaptarlos al mix eléctrico de producción en España en el año 2008 (REE, 2008), según muestra la Tabla 3.1. Para realizar los cálculos se ha utilizado la aplicación *SimaPro v7.1.8*.

Origen	kWh
Gas natural	0,232
Carbón, antracita	0,217
Nuclear	0,20
Hidroeléctrica	0,11
Eólica	0,1
Cogeneración con turbina de gas	0,06
Carbón, lignito	0,03
Fuel-oil	0,02
Cogeneración ciclo orgánico Rankine (ORC)	0,01
Hidroeléctrica reversible o de bombeo	0,01
Cogeneración con motor de biogás	0,006
Gas industrial	0,003
Solar Fotovoltaica	0,002

Tabla 3.1. Entradas desde la tecnosfera para la producción de 1 kWh en España (REE, 2008)

### **3.1.5. Etapas consideradas en el ciclo de vida de los materiales de construcción**

En la evaluación del impacto, se han considerado las siguientes etapas: fabricación, transporte, construcción y fin de vida.

En la etapa de fabricación se considera el suministro de materias primas, las necesidades de transporte asociadas y los procesos de fabricación en planta de los distintos materiales de construcción analizados.

En la etapa de transporte se ha considerado, para todos los materiales de construcción, un camión de 20-28 t recorriendo una distancia media de 100 km entre planta y obra, realizando un análisis de sensibilidad a la distancia recorrida.

En la etapa de construcción, únicamente se ha valorado el impacto asociado a la necesidad de algún material auxiliar como el mortero de cemento necesario para la colocación de ladrillos, baldosas, tejas, o el agua con el que se mezcla el cemento en su colocación, etc.

En la etapa de disposición final, se ha considerado el impacto debido a la demolición del edificio y la disposición final más habitual de cada material constructivo (Doka G., 2007). Se han considerado tres escenarios de disposición final: la eliminación directa en vertedero o en incineradora, el reciclado parcial previo paso por una planta de clasificación y el reciclaje directo en obra.

En consonancia con la metodología de *Ecoinvent*, la disminución de impactos debido al reciclaje se asigna completamente al nuevo material secundario creado a partir del reciclaje del material primario, pero en ningún caso sobre el propio material primario.

Si la disposición final consiste en la eliminación directa sin reciclaje, bien porque el material no pueda ser reciclado o porque se encuentre mezclado con otros materiales o por falta de tiempo o capacidad de las instalaciones, el material es extraído del edificio y dispuesto en un vertedero o incineradora. En este caso se consideran los impactos asociados al derribo del edificio, que incluyen la energía necesaria para la demolición y las emisiones de partículas derivadas, el transporte desde el edificio hasta el vertedero o incineradora y su disposición final en dichas instalaciones.

El reciclado parcial previo paso por una planta de clasificación se aplica cuando el material podría reciclarse, pero, al estar mezclado con otros materiales, su separación no puede realizarse en las instalaciones donde se está llevando a cabo la demolición del edificio. El material es extraído del edificio y transportado a una planta de clasificación. Los materiales separados en una planta de clasificación pueden ser reciclados o bien eliminados en vertederos o incineradoras. Por tanto, en las plantas de clasificación sólo se podrá separar una determinada fracción reciclable que variará en función del tipo de material. En este caso se consideran los impactos asociados al derribo del edificio (energía de demolición y partículas emitidas), el transporte desde el edificio hasta la planta de clasificación, el proceso de clasificación de los materiales, el transporte de la fracción no reciclable hasta el vertedero o incineradora y su disposición final en dichas instalaciones; por lo que la fracción reciclable queda libre de cargas. Por simplificar no se considera la

clasificación de aquellos materiales que terminen en incineradora, ya que su impacto es despreciable frente al impacto de la incineración.

Para el transporte de los materiales obtenidos del edificio demolido se ha supuesto un camión de 20-28 t recorriendo una distancia media de 10-15 km en el caso de envío a vertedero o incineradora, y de 22 km en el caso de envío a planta de clasificación (Doka G., 2007). Conviene reseñar que estas distancias pueden ser mayores dependiendo de la ubicación concreta del edificio.

El reciclado directo en obra conlleva que el material pueda extraerse del edificio para su posterior reciclaje sin necesidad de pasar por una planta de clasificación. En este caso se consideran sólo los impactos asociados al derribo del edificio (energía de demolición y partículas emitidas). Los impactos medioambientales asociados al transporte del material a reciclar, los posibles tratamientos previos al propio proceso reciclado, etc. son asignados completamente al nuevo producto creado a partir del material reciclado, pero en ningún caso al propio material reciclado.

Conviene destacar la incertidumbre existente al considerar el escenario de disposición final futuro de los materiales constructivos, ya que dicho escenario se produce una vez finalizada la vida útil del edificio, circunstancia que se produce 50 años o más, después de la construcción del edificio.

### 3.1.6. Modelización de las curvas de ahorro-inversión

Las curvas Ahorro–Inversión (Valero A., 1982) permiten cuantificar la disminución de los impactos del sector para un determinado nivel de inversión en medidas de mejora. Además el análisis de los parámetros que caracterizan este tipo de curvas permite obtener interesantes resultados como el ahorro máximo alcanzable en el sector o el grado de elasticidad del ahorro frente a la inversión.

Este tipo de curvas se obtienen ordenando las medidas de ahorro propuestas según su rentabilidad económica, de mayor a menor. En este estudio se ha considerado el ratio ahorro total – inversión total como referente del nivel de rentabilidad de cada medida, ya que permite valorar cualquier tipo de inversión (anual o plurianual) frente al ahorro total obtenido, a lo largo de toda la vida útil de la inversión, independientemente del tiempo.

Una vez ordenadas las medidas, se calcula la suma acumulada de las inversiones y ahorros obtenidos con la aplicación de las medidas, desde la más a la menos rentable, y se representan gráficamente dichos puntos, obteniendo la curva Ahorro–Inversión. Finalmente se caracteriza dicha curva mediante un ajuste de tipo exponencial:

$$A(I) = A_M * (1 - e^{-c*I}); \text{ donde:}$$

- A(I): Ahorro total obtenido a lo largo de la vida útil de la inversión valorado en energía final, energía primaria acumulada o emisiones equivalentes acumuladas (GWh ó GWh-Eq ó kt CO<sub>2</sub>-Eq).
- I: Inversión total realizada (€).

- $A_M$ : Ahorro máximo alcanzable en energía final, energía primaria acumulada o emisiones equivalentes acumuladas (GWh ó GWh-Eq ó kt CO<sub>2</sub>-Eq).
- $\epsilon$ : Coeficiente de saturación de la curva ahorro – inversión (€<sup>-1</sup>).

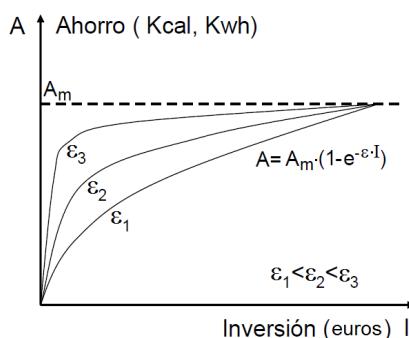


Figura 3.3. Modelización de la curva ahorro-inversión

En este modelo, al principio, se representan las medidas más rentables, por lo que pequeñas inversiones generan grandes ahorros. Conforme el nivel de inversión crece, los ahorros obtenidos siguen creciendo, pero de forma más moderada. A partir de un cierto nivel de inversión, la curva se satura, es decir, por más que se aumente la inversión, el ahorro ya no crece más. Ese límite asintótico de la curva se corresponde con el máximo ahorro alcanzable ( $A_M$ ) por el sector.

### 3.2. Análisis de ciclo de vida comparativo de diversos materiales de construcción

Para seleccionar los materiales a analizar se han considerado, por un lado, los materiales más utilizados actualmente en la edificación, y por el otro, materiales de origen natural, que, si bien a día de hoy, pueden presentar un uso minoritario, tienen un gran potencial de implantación, sustituyendo a los materiales actuales de mayor impacto energético y ambiental, para lograr el reto de conseguir una edificación sostenible.

Los materiales objeto del estudio se muestran en la siguiente tabla agrupados por tipologías.

Ladrillos, baldosas y tejas	Aislamientos térmicos	Cemento y hormigón	Maderas	Materiales comunes
Ladrillo	EPS Poliestireno expandido	Cemento	Madera aserrada	Acero
Ladrillo arcilla aligerada	Espuma rígida de poliuretano	Mortero de cemento	Madera laminada	Aluminio
Ladrillo silico-calcáreo	Lana de roca	Hormigón no armado	Tablero de madera aglomerado	Cobre
Baldosa cerámica	Corcho	Hormigón armado	Tablero de partículas orientadas OSB	PVC
Baldosa de hormigón	Fibra de celulosa reciclada			Vidrio plano
Teja cerámica	Lana de madera			
Teja de hormigón	Lana de oveja			
Tejado de fibrocemento				

Tabla 3.2. Materiales de construcción analizados



### 3.2.1.Ladrillos, baldosas y tejas

Según datos de la Asociación Hyspalit, que engloba a más de 170 fabricantes españoles, la producción promedio de los años 2005-2007 de las instalaciones del sector de la cerámica estructural en España ascendió a 21,9 millones de toneladas anuales, siendo el mayor productor a nivel europeo de este material para la construcción. Los principales consumos energéticos en las plantas de este sector son gas natural (que supone aproximadamente el 70% del consumo total del sector) y electricidad, ascendiendo a 12.009 GWh/año de combustible y 1.034 GWh/año de electricidad, a lo que hay que añadir el consumo de combustible para cogeneración que es de 1.980 MWh/año. Por otra parte, las emisiones totales de CO<sub>2</sub> ascienden a 4.095 kt CO<sub>2</sub>/año (algo menos del 3% del total de emisiones a nivel nacional), de las que el 65% corresponden a emisiones directas de procesos de combustión, el 25% a emisiones otros procesos y el 10% a procesos de cogeneración.

En lo que respecta a las baldosas cerámicas, según la asociación ASCER, la producción estimada en España es de 324,4 millones de m<sup>2</sup>/año con unos consumos de gas y electricidad de 15.800 y 930 GWh/año respectivamente, unas emisiones de 3 Mt CO<sub>2</sub>/año y una generación estimada en cogeneración de 1.400 GWh/año. Esta industria está altamente concentrada en la provincia de Castellón donde se ubican el 81% de las empresas y más del 94% de la producción nacional.

#### 3.2.1.1.Ladrillo

Aunque existen distintos tipos de ladrillos, los cerámicos son los más habituales, pudiéndose ser sólidos o huecos. La materia prima principal en la fabricación del ladrillo es la arcilla, extraída habitualmente de canteras próximas a la planta. A su vez, el principal componente de la arcilla es el caolín, procedente de la erosión del feldespato, que contiene diversas impurezas, como el cuarzo, mica, feldespato residual, calcita, óxidos de hierro, etc. (Wendehorst R., Vollenschaar D., 1998). La fórmula del caolín se puede aproximar a la de la caolinita (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2SiO<sub>2</sub> 2H<sub>2</sub>O). El uso de diversos aditivos tales como serrín, escorias en polvo, etc. está cada vez más extendido, mejorando tanto el proceso productivo, reduciendo el consumo de combustible en la cocción, como el producto final, incrementando su porosidad y su capacidad aislante. Puesto que la fabricación del ladrillo constituye una industria de bajo valor añadido, resulta esencial la minimización de los costes de transporte entre las canteras y la planta de producción (Hauck, et al., 1997).

Sustancia	Unidad	Cantidad
Arcilla genérica, en terreno	kg	1,35
Energía (poder calorífico superior), en forma de biomasa	MJ	0,23
Gas natural, en terreno	m <sup>3</sup>	0,04
Grava, en terreno	kg	0,03
Calcita, en terreno	kg	0,03
Dióxido de carbono, en el aire	kg	0,02
Petróleo, crudo, en terreno	kg	0,01

Tabla 3.3.Datos de inventario: principales materias primas para la fabricación de 1 kg de ladrillo (valor de corte=1%)

En la actualidad no existen inventarios de ciclo de vida específicos para la fabricación de ladrillos en España. Por ello, teniendo en cuenta que los procesos de fabricación son similares, se han adoptado inventarios existentes basados en 12 plantas ubicadas en Alemania, Austria y Suiza (Bruck M., 1996). La arcilla se carga en una trituradora primaria para conseguir una primera reducción del tamaño. Seguidamente se le añade agua y la arcilla es molida, mezclada y plastificada, consiguiendo un material fino adecuado para la producción de ladrillo. Desde la sala de molido, el material es transportado a una sala de almacenamiento, donde se mantiene curando en torno a 2 meses. Una vez curado se introduce en un proceso continuo de extrusión y cortado. Las piezas formadas y alineadas entran en una zona de pre-secado y finalmente se cargan en la secadora. Las secadoras alcanzan normalmente temperaturas de 200°C, utilizando calor residual de la zona de enfriamiento del horno, si bien en algunas plantas el calor se obtiene únicamente a partir de gas u otros combustibles. La tipología más común de horno para cocción de ladrillo es el horno-túnel de unos 100-150 metros de longitud, incluyendo una zona de precalentamiento, una zona de cocción que se mantiene normalmente a una temperatura máxima de 1.000°C y una zona de enfriamiento donde se enfrían los ladrillos hasta la temperatura ambiente antes de salir del horno. Los ladrillos son embalados en pallets y enviados por camión a su destino.

La producción de gas natural en tierra (on-shore) y aguas marinas (off-shore) es el proceso que más contribuye al impacto en energía incorporada y puntuación única. Además, el gas es la sustancia que más contribuye a la energía incorporada (47%) y puntuación única (34%), seguido del petróleo, con una contribución del 31% y 22% respectivamente sobre los impactos anteriores. Asimismo, el 66% del CO<sub>2</sub>-Eq emitido globalmente se debe a la combustión de gas natural en el horno y el secadero de la planta. En cuanto a la huella hídrica, el mayor impacto (19% sobre el total) está en el consumo de agua necesario para la generación eléctrica en plantas termoeléctricas de carbón y la sustancia que más contribuye al impacto es el agua evaporada en procesos de enfriamiento (50%).

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida				Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Construcción	Disposición Final (vertedero)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	2,79	0,33	0,15	0,30	3,56
	78,2%	9,2%	4,3%	8,3%	
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	0,22	0,02	0,02	0,01	0,27
	80,3%	7,1%	7,7%	4,9%	
Huella hídrica (l)	1,21	0,15	0,29	0,24	1,89
	63,8%	7,8%	15,5%	12,9%	
Puntuación única (mPt)	11,20	1,76	0,61	2,44	16,00
	70,0%	11,0%	3,8%	15,2%	

Tabla 3.4. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de ladrillo

### 3.2.1.2. Ladrillo de arcilla aligerada

Los ladrillos de arcilla aligerada están hechos principalmente de arcilla, que actúa como agente aglutinante junto con algunos aditivos. En este estudio el aditivo considerado es una mezcla de paja de trigo, cebada y centeno, si bien otros aditivos aligerantes minerales u orgánicos son posibles (Starzner S., Würmer-Weiss P., 2000).

Sustancia	Unidad	Cantidad
Energía (poder calorífico superior), en forma de biomasa	MJ	2,83
Arcilla genérica, en terreno	kg	1,01
Dióxido de carbono, en el aire	kg	0,22
Gas natural, en terreno	m <sup>3</sup>	0,06
Grava, en terreno	kg	0,01

Tabla 3.5. Datos de inventario: principales materias primas para la fabricación de 1 kg de ladrillo de arcilla aligerada (valor de corte=1%)

Dos de las principales características físicas de los ladrillos de arcilla aligerada (Starzner S., Würmer-Weiss P., 2000) son la densidad que varía entre 600 y 1.200 kg/m<sup>3</sup> y la conductividad térmica, que oscila entre 0,17 W/mK (para una densidad de 600 kg/m<sup>3</sup>) y 0,47 W/mK (para una densidad de 1.200 kg/m<sup>3</sup>).

En la elaboración del ladrillo de arcilla aligerada, las materias primas se mezclan en una proporción en peso de 85% de arcilla y 15% de paja. Estos materiales se mezclan con agua y se prensan. Posteriormente se secan y cuecen en un horno calentado por gas natural y finalmente se embalan. (Starzner S., Würmer-Weiss P., 2000; Weibel T., Stritz A., 1995).

La paja utilizada es la sustancia que más contribuye a la energía incorporada (46%), si bien toda ella es de origen biomásico, lo que aumenta la fracción renovable respecto a un ladrillo convencional. A continuación estaría el gas natural (37%), que también tiene una importante contribución a la puntuación única.

Cabe destacar la absorción de CO<sub>2</sub>, asociada al crecimiento de la paja empleada como materia prima, que se produce globalmente en la fabricación de estos ladrillos. Dicha absorción compensa totalmente las emisiones debidas a la combustión del gas natural para los procesos térmicos de la planta, que es de 0,105 kg CO<sub>2</sub>.

En cuanto a la huella hídrica, la sustancia que más contribuye al impacto es el agua evaporada en procesos de enfriamiento (39%), repartiéndose el impacto de forma homogénea entre los distintos procesos.

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida				Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Construcción	Disposición Final (vertedero)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	5,49	0,33	0,15	0,30	6,27
	87,6%	5,2%	2,5%	4,7%	
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	-0,057	0,019	0,021	0,013	-0,004
	-51,8%	17,4%	18,8%	12,0%	
Huella hídrica (l)	0,73	0,15	0,29	0,24	1,42
	51,7%	10,4%	20,8%	17,2%	
Puntuación única (mPt)	17,17	1,76	0,61	2,44	21,98
	78,1%	8,0%	2,8%	11,1%	

Tabla 3.6. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de ladrillo de arcilla aligerada

### 3.2.1.3. Ladrillo silico-calcáreo

Las materias primas para la fabricación de 1 kg de ladrillo silico-calcáreo (Starzner S., Würmer-Weiss P., 2000) son: arena de sílice (0,948 kg), cal (0,086 kg), aditivos –piedra caliza y cuarzo molidos, grava, etc. – (0,033 kg) y agua (0,225 l). Además, para colorear los ladrillos se suelen usar pigmentos de óxidos de cromo y hierro. Su densidad es relativamente baja, y varía entre 700 y 900 kg/m<sup>3</sup>.

Sustancia	Unidad	Cantidad
Grava, en terreno	kg	1,00
Calcita, en terreno	kg	0,18
Dióxido de carbono, en el aire	kg	0,07
Energía (poder calorífico superior), en forma de biomasa	MJ	0,06
Petróleo, crudo, en terreno	kg	0,02

Tabla 3.7. Datos de inventario: principales materias primas para la fabricación de 1 kg de ladrillo silico-calcáreo (valor de corte=1%)

El proceso de producción se divide en cinco pasos: La arena y piedra caliza de canteras locales se almacenan en silos para luego ser mezcladas en una proporción de una parte de piedra caliza y doce partes de arena. Dicha mezcla de crudo se lleva mediante a las vasijas de reacción. En el interior de los reactores, la cal viva pasa a cal hidratada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Este proceso dura aproximadamente 4 horas. Si es necesario, se añade agua a la mezcla para conseguir una humedad homogénea. Mediante prensas automáticas, se da forma a los ladrillos con una presión de 15  $\text{N}/\text{mm}^2$ . El endurecimiento de los ladrillos se produce en una vasija a presión con vapor saturado a una presión de 12-16 bar, y una temperatura de 160-200°C, durante un período de 4-8 horas. Estos valores dependen principalmente de la resistencia deseada. En el proceso de endurecimiento los compuestos de ácido silícico conforman junto con la cal hidratada un material cristalino que mantiene unidos los gránulos de arena en una forma sólida. Después del endurecimiento y enfriamiento, los ladrillos de cal están listos para su uso. El consumo de energía primaria en este proceso varía entre 738 y 907 MJ/t (Starzner S., Würmer-Weiss P., 2000), siendo el gasóleo (56%), el gas natural (40%) y el fuelóleo (4%) los combustibles más utilizados en los procesos térmicos de la planta (Cordes R., et al., 1996).

Las distancias de transporte de las materias primas se estiman considerando la habitual cercanía entre las canteras y las plantas. Para la arena se toma una distancia de 5 km en un camión de 28t, para la cal se considera una distancia de 100 km -el 50% en tren y el 50% por camión- (Weibel T., Stritz A., 1995).

Las emisiones a la atmósfera proceden fundamentalmente de la combustión de los combustibles. Además se considera la absorción de  $\text{CO}_2$  en el proceso de reacción de la cal viva para obtener carbonato de calcio, en base a la fórmula estequiométrica:  $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \Rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ . Por ello, la cantidad de  $\text{CO}_2$  absorbida del aire es de 0,067 kg por kg de ladrillo producido.

Los inventarios utilizados para este estudio, procedentes de *Ecoinvent*, están basados en los valores medios extraídos de 74 compañías alemanas.

La producción de petróleo en tierra (on-shore) y aguas marinas (off-shore) es el proceso que más contribuye al impacto en energía incorporada y puntuación única. De este modo, el petróleo es la sustancia que más contribuye a la energía incorporada (62%) y la puntuación única (41%). Asimismo, el 67% del  $\text{CO}_2$ -Eq emitido globalmente se debe al proceso de producción en planta de la cal viva necesaria para la producción del ladrillo. En cuanto a la huella hídrica, el mayor impacto (48% sobre el total) está en el consumo de agua necesario para el proceso de obtención de arena en canteras.

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida				Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Construcción	Disposición Final (vertedero)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	1,41 64,4%	0,33 15,0%	0,15 7,0%	0,30 13,6%	2,18
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	0,07 55,7%	0,02 16,1%	0,02 17,3%	0,01 11,0%	0,12
Huella hídrica (l)	2,33 77,3%	0,15 4,9%	0,29 9,8%	0,24 8,1%	3,01
Puntuación única (mPt)	5,50 53,4%	1,76 17,1%	0,61 5,9%	2,44 23,6%	10,30

Tabla 3.8. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de ladrillo silico-calcáreo

### 3.2.1.4. Baldosa cerámica

Las baldosas cerámicas son piezas impermeables, con distintos espesores, fabricadas con arcillas, sílice, distintos fundentes y colorantes, y un recubrimiento vítreo denominado esmalte cerámico. Las arcillas utilizadas en la composición del soporte, pueden ser de cocción roja, blanca o de distintos colores. Igualmente la cerámica puede denominarse como azulejo de pasta blanca, azulejo de pasta roja, gres esmaltado o porcelánico, siendo cada uno de ellos un producto con características técnicas diferentes.

En general, los revestimientos cerámicos son porosos (un 12-14% de absorción de agua) lo que favorece la adherencia a la pared. En cambio, el gres y el porcelánico, poseen una porosidad baja. El porcelánico es un producto cerámico realizado con esmaltes de alta calidad con una absorción de agua inferior a 0,5% con lo que se consiguen mejores características técnicas: resistencia mecánica, resistencia al hielo, a productos de limpieza, etc. Por su parte, el gres posee una porosidad del 4-5%, por lo que su uso es menor en detrimento del porcelánico por poseer este último mejores características.

Las etapas básicas en la producción de baldosa cerámica son la adquisición de materia prima, el mezclado, conformado y secado, el vitrificado, cocción, pulido y embalaje.

Sustancia	Unidad	Cantidad
Grava, en terreno	kg	0,86
Arcilla genérica, en terreno	kg	0,53
Energía (poder calorífico superior), en forma de biomasa	MJ	0,28
Gas natural, en terreno	m <sup>3</sup>	0,24
Calcita, en terreno	kg	0,11
Carbón, antracita, genérico, en terreno	kg	0,08
Yeso, en terreno	kg	0,07
Carbón, lignito, en terreno	kg	0,03
Hierro, 46% en mineral, 25% en mineral crudo, en terreno	kg	0,03
Petróleo, crudo, en terreno	kg	0,03
Dióxido de carbono, en el aire	kg	0,03
TiO <sub>2</sub> , 54% de ilmenita, 2,6% en mineral crudo, en terreno	kg	0,02

Tabla 3.9. Datos de inventario: principales materias primas para la fabricación de 1 kg de baldosa cerámica (valor de corte=1%)

En este estudio se han contrastado los inventarios de *Ecoinvent* procedentes de 2 factorías de un importante productor europeo de cerámica sanitaria (ÖSPAG, 2002) y de un productor italiano (Nicoletti, et al., 2002), con los datos de campo obtenidos del productor Ceracasa, ubicado en el municipio de Alcora (Castellón).

Los datos recopilados de Ceracasa se refieren a la producción del año 2008. Esta empresa opera de modo continuo, consumiendo globalmente 10.150.000 kWh de electricidad a media tensión, 6.790.000 kWh de gas natural y 50.000 litros de gasóleo.

En el atomizado, compuesto principalmente por arcilla, se realiza una extracción de humedad mediante aire caliente obteniendo al final del proceso una humedad entre el 5–6%. Llama la atención el uso de arcillas de pasta blanca procedentes de países como Ucrania, cuando se podrían utilizar arcillas de pasta roja que permiten obtener un producto de calidad similar, y que están disponibles en cantidad y calidad suficiente en las provincias de Castellón y de Teruel.

Material	Procedencia	Medio de transporte
Arcilla A	Ucrania	Marítimo
Arcilla B	Inglaterra	Marítimo
Arcilla C	Portugal	Marítimo
Arena feldespática	Nacional	Camión
Feldespatos 1	Turquía	Marítimo
Feldespatos 2	Italia	Marítimo
Feldespatos 3	Nacional	Camión

Tabla 3.10. Composición y procedencia del atomizado

El proceso de atomizado no se realiza en la propia planta sino que se transporta en camiones de 25 t a plena carga desde una planta situada en el municipio de Onda (18 km) que abastece a varias plantas cerámicas de la zona. A lo largo del año se realizan 510 viajes. En total se consumen 12.750.903 kg/año de atomizado para producir 564.699 m<sup>2</sup> de baldosa, lo que supone un consumo de 22,58 kg de arcilla por m<sup>2</sup> de baldosa.

Conviene destacar que todas las piezas rotas y descartes antes (tiesto crudo) y después (tiesto cocido) de la cocción, previo paso por un sistema de trituración de la planta; así como las aguas residuales tratadas, transferidas a unas balsas exteriores anexas, se transportan finalmente al atomizador situado en Onda para su reutilización.

En la planta analizada, totalmente automatizada, el atomizado se recepciona en tolvas y se almacena en baterías de silos para su posterior prensado. En los silos se añade, por cuestiones estéticas, un coloreador a base de pigmento sólidos en función del tipo de producto. Los silos alimentan a las prensas oleodinámicas con una fuerza de más de 1.800 t/cm<sup>2</sup>, que conforman la pieza a la forma y espesor elegidos. Para ello se dispone de moldes metálicos reutilizables para distintos formatos. El resultado del prensado es un producto compacto, de gran dureza y mínima porosidad.

Posteriormente se realiza el secado de las piezas conformadas. Las piezas entran con una humedad del 4–5% que se rebaja hasta llegar a un nivel de humedad prácticamente nulo (<0,5%). La pieza entra por la parte inferior del secadero que se encuentra a una temperatura de 100°C y asciende verticalmente a la parte superior

que se encuentra a 250°C, para volver a descender posteriormente, saliendo el producto a una temperatura de 100°C. El secadero se alimenta de gas natural y la duración del proceso es de 25 minutos aproximadamente.



Figura 3.4. Secadero (izqda.) y líneas de decoración-esmaltación (dcha.)

Seguidamente se eliminan rebabas y se pule la superficie mediante un cepillo. El polvo y partículas producidas en estas y otras operaciones de la planta es aspirado para evitar su acumulación.

La pieza se moja ligeramente con agua para facilitar la adherencia del esmalte y se pasa por las línea de decoración-esmaltación, en las que se deposita una capa de esmalte. El esmalte llega en polvo a la planta, donde antes de proceder a su aplicación es agitado y mezclado con agua en varios molinos. La cantidad de esmalte a aplicar a la pieza se controla por medio de un variador de velocidad que hace que la pieza pase más lenta o más rápida y que reciba por tanto más o menos esmalte, reutilizando el esmalte sobrante del proceso. Se consumen 188.599 kg/año de esmalte, que se transportan en camión desde los alrededores. El consumo de esmalte de Ceracasa (0,0148 kg de esmalte/kg de atomizado) es 3 veces menor al considerado en *Ecoinvent v2.0* (2007), debido a las mejores técnicas empleadas.

Posteriormente las piezas se pueden decorar, según el modelo, por medio de dos sistemas: rotocolor e inyección. El sistema rotocolor consta de varios rodillos de silicona con diseño impreso en la superficie. Los rodillos se alimentan con distintas tintas, aplicando cada uno de ellos una tinta diferente a la pieza hasta lograr el efecto deseado y reutilizando el tinte sobrante.

El sistema de decoración por inyección es más eficiente. A diferencia del rotocolor, este sistema consta sólo de 4 tintas (similar al de las impresoras inkjet) que se combinan entre sí y no requiere el cambio de tintas ni el cambio y limpieza de rodillos según el modelo de pieza a colorear. En cualquier caso, la cantidad de tinta empleada es mínima ( $2E-3$  kg/kg de atomizado).

Adicionalmente, dependiendo del modelo de pieza, se aplica un esmalte adicional pulverizado para evitar el desgaste de la tinta y/o se proyecta granilla (1 kg de granilla por cada  $m^2$  de pieza) sobre la pieza para conseguir un efecto de pulido. Para mejorar la adherencia se aplica cola antes y después del proyectado de granilla.

A continuación las piezas se introducen en un horno de monococción para su cocción a altas temperaturas en ciclos más o menos rápidos en función de las especificaciones del producto. La pieza esmaltada y decorada entra a un horno de 115 metros de longitud, pasando por un secadero previo, desplazándose por su

interior y recibiendo distintas temperaturas en distintos momentos (curva de cocción) que dura entre 45 y 60 minutos. El horno consta de quemadores de alta velocidad de gas natural. En el transcurso de este ciclo, la pieza alcanza los 1.200°C, enfriándose posteriormente antes de su salida del horno. El enfriamiento se realiza por convección forzada utilizando varios ventiladores. El aire caliente obtenido en este proceso de enfriamiento se utiliza exclusivamente para el secado previo, cubriendo todas las necesidades térmicas de este proceso. Este secado es necesario para eliminar la humedad que hayan podido coger los productos desde su salida de la etapa de esmaltado-decoración hasta su cocción.

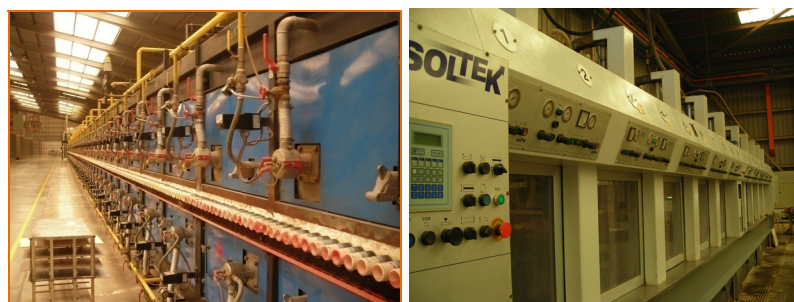


Figura 3.5. Horno de cocción (izqda.) y sección de pulido-rectificado (dcha.)

En determinados modelos de gama alta, las piezas pasan a una sección de pulido y rectificado, donde se pule la pieza por medio de un conjunto de muelas de polvo diamantado y ligante resinoide. El desgaste sufrido por las muelas requiere su sustitución periódica como parte de las tareas de mantenimiento. En total se consumen 263 muelas/año, transportadas mediante camión de un proveedor próximo, lo que equivale a 228,18 kg/año.

Posteriormente las piezas entran a un pequeño secadero alimentado por gas natural que retira el agua antes de proceder al embalaje de la pieza con plásticos y cartón. Los envases y embalajes utilizados ascienden a 75.711 kg/año de cartón reciclado 100%, 203.238 kg/año de pallets 100% reutilizados y 4.403 kg/año de plásticos de embalaje. En todos los casos se transportan por camión en trayectos cortos.

Uno de los productos innovadores desarrollados en los últimos años por Ceracasa tras meses de investigación con FMC FORET y el Instituto de Tecnología Química de la Universidad Politécnica de Valencia es la “BionicTile<sup>®</sup>” (García H., et al., 2009). Su proceso productivo es similar al descrito anteriormente, sin más que añadir al esmalte unas micras de óxido de titanio y un conjunto de sustancias dopantes. Como resultado se obtiene una baldosa que, situada en exteriores, dispone de una capacidad para capturar hasta 85,57 mg de NOx por hora, mediante foto-catálisis de las moléculas de NOx en compuestos nitrogenados inocuos gracias a la acción de los rayos ultravioleta que contiene la radiación solar.

La siguiente tabla muestra las principales diferencias existentes entre los consumos energéticos en planta de *Ecoinvent* y los datos recopilados en la empresa analizada, debido a la diferencia existente en los niveles de optimización de los procesos productivos en las plantas consideradas. Por ello, se concluye la necesidad de contrastar los datos utilizados en los estudios de ACV para adaptarlos a la realidad del producto que se desea analizar. En este sentido, resulta de vital importancia el desarrollo de Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) por parte de los fabricantes de productos de la construcción. De este modo los resultados obtenidos en los estudios de ACV serían mucho más precisos.



	Ecoinvent v2.0 (2007)	Ceracasa
Consumo de gas natural en planta (kWh)	1,62	0,53
Consumo de electricidad en planta (kWh)	0,31	0,80

Tabla 3.11. Consumos de energía final en planta en Ecoinvent comparados con los obtenidos en la empresa analizada

En los inventarios de *Ecoinvent*, se considera igualmente que el combustible utilizado en los procesos térmicos es gas natural y se estiman unas emisiones de polvo (partículas inferiores a 2,5  $\mu\text{m}$ ) en la manipulación de las materias primas de 8,71E-03 kg/kg (EPA, 1998). Según estos inventarios, el gas es la sustancia que más contribuye a la energía incorporada (60%). Asimismo, el 40% del CO<sub>2</sub>-Eq emitido globalmente se debe a la combustión de gas natural en los procesos térmicos de la planta. En cuanto a la huella hídrica, el mayor impacto (18% sobre el total) está en el consumo de agua necesario para la generación eléctrica en plantas termoeléctricas de carbón y la sustancia que más contribuye al impacto es el agua evaporada en procesos de enfriamiento (54%). Por último, la emisión de partículas de polvo menores a 2,5  $\mu\text{m}$  en los distintos los procesos de planta supone el 73% de la puntuación única.

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida				Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Construcción	Disposición Final (vertedero)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	14,87	0,33	0,15	0,30	15,65
	95,0%	2,1%	1,0%	1,9%	
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	0,80	0,02	0,02	0,01	0,86
	93,8%	2,3%	2,4%	1,5%	
Huella hídrica (l)	13,77	0,15	0,29	0,24	14,45
	95,3%	1,0%	2,0%	1,7%	
Puntuación única (mPt)	221,55	1,76	0,61	2,44	226,35
	97,9%	0,8%	0,3%	1,1%	

Tabla 3.12. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de baldosa cerámica

### 3.2.1.5. Baldosa de hormigón

Las baldosas prefabricadas de hormigón se utilizan principalmente en la arquitectura paisajística. La materia prima utilizada es hormigón en masa húmedo que se vierte en un molde y se prensa. Después de su secado con aire, el hormigón moldeado se somete a un pulido, siendo finalmente embalado. Los consumos energéticos en planta son reducidos: 2E-03 kWh eléctricos y 6E-03 kWh de gasóleo por cada kg de baldosa. El inventario considerado en este estudio desprecia las piezas descartadas en el proceso y las aguas residuales (Vogel M., et al., 2003).

Sustancia	Unidad	Cantidad
Grava, en terreno	kg	0,71
Calcita, en terreno	kg	0,27
Arcilla genérica, en terreno	kg	0,10
Energía (poder calorífico superior), en forma de biomasa	MJ	0,04
Carbón, antracita, genérico, en terreno	kg	0,02
Petróleo, crudo, en terreno	kg	0,01

Tabla 3.13. Datos de inventario: principales materias primas para la fabricación de 1 kg de baldosa de hormigón (valor de corte=1%)

El petróleo es la sustancia que más contribuye a la energía incorporada (55%), seguido del carbón (18%). El 72% de la contribución al calentamiento global se debe al proceso de producción del clínker, utilizado como materia prima en la fabricación del cemento necesario para la fabricación de las baldosas. Por otra parte, la huella hídrica se centra en la producción de grava redondeada (37%) y en la producción del clínker (13%). En cuanto a la puntuación única, el mayor impacto está nuevamente en la producción de clínker (18%), seguido por la producción de petróleo y la disposición final en vertedero de las baldosas (9%). Las sustancias más relevantes en puntuación única son el petróleo (33%), así como las emisiones de óxidos de nitrógeno (18%), partículas (19%) y dióxido de carbono (13%).

Categoría de impacto	Etapas del ciclo de vida				Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Construcción	Disposición Final (vertedero)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	1,38	0,33	0,15	0,34	2,20
	62,8%	14,8%	7,0%	15,4%	
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	0,24	0,02	0,02	0,02	0,29
	80,9%	6,7%	7,2%	5,3%	
Huella hídrica (l)	2,30	0,15	0,29	0,27	3,01
	76,4%	4,9%	9,8%	9,0%	
Puntuación única (mPt)	6,54	1,76	0,61	2,77	11,67
	56,0%	15,1%	5,2%	23,7%	

Tabla 3.14. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de baldosa de hormigón

### 3.2.1.6. Teja cerámica

Las tejas cerámicas se fabrican mediante extrusión para darles su forma característica, incorporando habitualmente un revestimiento antideslizante. Tienen una estructura porosa resistente a la intemperie e impermeable al agua. El proceso de fabricación de las tejas cerámicas es muy similar al descrito para los ladrillos comunes, si bien presenta algunas diferencias.

Por ejemplo, el tiempo de cocción de las tejas cerámicas es aproximadamente 1,5 veces superior al de los ladrillos (Weibel T., Stritz A., 1995) debido a la necesidad de incrementar su resistencia en caso de heladas. Las emisiones de HCl y HF se incrementan en un factor de 5 (EPA, 2008) debido a la diferente composición de la arcilla para tejas, mientras que el consumo de electricidad se ha duplicado prácticamente con respecto al del ladrillo. En cualquier caso, la arcilla, habitualmente localizada en las proximidades de la planta, sigue siendo la materia prima principal. Si bien, las tejas suelen incorporar una pequeña cantidad de colorante: 3,6 g por kg de teja, dicho colorante se ha dejado fuera de los límites del sistema, debido a la confidencialidad de su composición.

Los inventarios utilizados para la teja cerámica consideran diversos combustibles fósiles para los procesos térmicos, si bien el gas natural es predominante, y asumen que todos los calores residuales se reutilizan en los procesos de secado.

Sustancia	Unidad	Cantidad
Arcilla genérica, en terreno	kg	1,35
Gas natural, en terreno	m <sup>3</sup>	0,06
Energía (poder calorífico superior), en forma de biomasa	MJ	0,04
Grava, en terreno	kg	0,03
Calcita, en terreno	kg	0,03
Petróleo, crudo, en terreno	kg	0,02
Carbón, antracita, genérico, en terreno	kg	0,01

Tabla 3.15. Datos de inventario: principales materias primas para la fabricación de 1 kg de teja cerámica (valor de corte=1%)

Al igual que en los ladrillos comunes, el gas la sustancia que más contribuye a la energía incorporada (54%) y puntuación única (38%), seguido del petróleo, con una contribución del 27% y 19% respectivamente sobre los impactos anteriores. Por otra parte, el 67% del CO<sub>2</sub>-Eq emitido globalmente se debe a la combustión de gas natural para los procesos térmicos de la planta. En cuanto a la huella hídrica, el mayor impacto (28% sobre el total) está en el consumo de agua necesario para la generación eléctrica en plantas termoeléctricas de carbón y la sustancia que más contribuye al impacto es el agua evaporada en procesos de enfriamiento (57%).

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida				Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Construcción	Disposición Final (vertedero)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	3,81	0,33	0,15	0,30	4,59
	83,1%	7,1%	3,3%	6,5%	
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	0,35	0,02	0,02	0,01	0,41
	86,9%	4,8%	5,1%	3,3%	
Huella hídrica (l)	1,77	0,15	0,29	0,24	2,46
	72,2%	6,0%	12,0%	9,9%	
Puntuación única (mPt)	16,31	1,76	0,61	2,44	21,11
	77,2%	8,3%	2,9%	11,5%	

Tabla 3.16. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de teja cerámica

### 3.2.1.7. Teja de hormigón

La principal materia prima utilizada es hormigón en masa húmedo compuesto por cemento portland (0,2 kg/kg de teja), arena (0,7 kg/kg de teja), y agua (0,08 kg/kg de teja) que se mezcla con óxido de hierro (0,0049 kg/kg de teja) y pintura de látex (0,015 kg/kg de teja). El proceso productivo es similar al descrito anteriormente para las baldosas prefabricadas de hormigón (Vogel M., et al., 2003).

Sustancia	Unidad	Cantidad
Grava, en terreno	kg	0,74
Calcita, en terreno	kg	0,22
Arcilla genérica, en terreno	kg	0,08
Energía (poder calorífico superior), en forma de biomasa	MJ	0,04
Carbón, antracita, genérico, en terreno	kg	0,02
Petróleo, crudo, en terreno	kg	0,01

Tabla 3.17. Datos de inventario: principales materias primas para la fabricación de 1 kg de teja de hormigón (valor de corte=1%)

El petróleo es la sustancia que más contribuye a la energía incorporada (49%), y a la puntuación única (32%). En cuanto a los procesos, la producción de pigmentos de dióxido de titanio para la pintura de látex utilizada en las baldosas es el de

mayor contribución a la energía incorporada (14%) y el segundo que más contribuye a la puntuación única (9%). Por otra parte, la producción de clínker conlleva también impactos elevados: el 63% de la contribución al calentamiento global y el 14% de la puntuación única se deben a este proceso. En cuanto a la huella hídrica, se centra principalmente en la obtención de arena en canteras (27%) y el agua evaporada en los diversos procesos de enfriamiento (40%).

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida				Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Construcción	Disposición Final (vertedero)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	1,84 69,2%	0,33 12,3%	0,15 5,8%	0,34 12,7%	2,66
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	0,22 79,5%	0,02 7,1%	0,02 7,7%	0,02 5,7%	0,27
Huella hídrica (l)	3,39 82,7%	0,15 3,6%	0,29 7,2%	0,27 6,6%	4,10
Puntuación única (mPt)	7,61 59,7%	1,76 13,8%	0,61 4,8%	2,77 21,7%	12,74

Tabla 3.18. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de teja de hormigón

### 3.2.1.8. Tejado de fibrocemento

El fibrocemento es un material constituido por una mezcla de cemento y fibras sintéticas de refuerzo. Se suele utilizar para cubiertas en forma de plancha ondulada (uralita), depósitos y tuberías de suministro de agua, etc. En su fabricación tradicionalmente se han utilizado fibras de amianto, material altamente cancerígeno. En España, desde 1990, este material está prohibido, por lo que ha sido sustituido por otro tipo de fibras. Aun así se trata de un material altamente tóxico.

El tejado de fibrocemento destaca por su bajo precio, impermeabilidad y resistencia a heladas, aislamiento térmico (con una conductividad de 0,5 W/mK), así como su ligereza y fácil manipulación. Su densidad es de 1.700 kg/m<sup>3</sup> con un peso aproximado de 19 kg/m<sup>2</sup>.

El tejado de fibrocemento está compuesto principalmente por cemento portland (72,4% en peso), agua y aditivos como harina de piedra caliza (11,1% en peso cada uno de ellos), y de fibras de refuerzo de alcohol polivinílico (1,8% en peso), y fibras de celulosa nuevas (1,8% en peso) y recicladas (1,8% en peso).

Sustancia	Unidad	Cantidad
Energía (poder calorífico superior), en forma de biomasa	MJ	1,02
Calcita, en terreno	kg	0,81
Arcilla genérica, en terreno	kg	0,27
Carbón, antracita, genérico, en terreno	kg	0,10
Dióxido de carbono, en el aire	kg	0,09
Grava, en terreno	kg	0,08
Gas natural, en terreno	m <sup>3</sup>	0,07
Petróleo, crudo, en terreno	kg	0,06
Carbón, lignito, en terreno	kg	0,03
Hierro, 46% en mineral, 25% en mineral crudo, en terreno	kg	0,03
Agua, enfriamiento, origen natural genérico	m <sup>3</sup>	0,01

Tabla 3.19. Datos de inventario: principales materias primas para la fabricación de 1 kg de tejado de fibrocemento (valor de corte=1%)

Para la fabricación del tejado de fibrocemento (Starzner S., Würmer-Weiss P., 2000), las materias primas se mezclan con agua hasta obtener una pasta homogénea en unos cilindros rotativos tamizados, de modo que la superficie del tamiz se va cubriendo cubre con una capa de aproximadamente 1 mm, que se transporta mediante cinta transportadora. Unas boquillas de aspiración situadas sobre dicha cinta deshidratan el material que se introduce en un nuevo cilindro giratorio hasta alcanzar el espesor requerido. En este proceso, las fibras de las distintas capas se interconectan. Seguidamente, el material se corta y se presiona obteniendo la típica forma corrugada de las placas de fibrocemento. Después de varias horas, el producto es lo suficientemente resistente como para ser manipulado. Finalmente se somete al producto a un proceso de curado mediante su almacenamiento durante 28 días o bien mediante un curado con vapor, tras el cual se procede a un revestimiento final de la superficie.

La mayor parte del consumo energético en la fabricación de losas de fibrocemento se produce en la fabricación previa del clínker, con el que se produce el cemento utilizado. Los consumos en planta son poco significativos: la energía térmica utilizada para la formación y el secado de los productos de fibrocemento se produce en hornos de gasóleo de distinta potencia y se limita a 0,072 kWh/kg, mientras que los consumos eléctricos en planta son de 0,267 kWh/kg.

Las aguas residuales del proceso de producción suelen ser muy alcalinas, debido a la elevada cantidad de óxido de calcio (cal viva), y debe ser neutralizada antes de ser vertida. El agua residual alcalina con un pH de 13,5 pasa a tener un pH de 8,5. Para neutralizar el agua residual, se añade una cierta cantidad de ácido y además las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de la combustión se pasan a través de las aguas residuales. El CO<sub>2</sub> reacciona con el óxido de calcio para formar carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>) tal como muestra la siguiente reacción estequiométrica: CaO (56 mol) + CO<sub>2</sub> (44 mol) => CaCO<sub>3</sub> (100 mol), lo que supone: CaO (0,91 kg/m<sup>3</sup> de agua residual) + CO<sub>2</sub> (0,72 kg/m<sup>3</sup> de agua residual) => CaCO<sub>3</sub> (1,63 kg/m<sup>3</sup> de agua residual). Por tanto, la cantidad de CO<sub>2</sub> que reacciona con el agua residual es de 0,72 kg/m<sup>3</sup> (Weibel T., Stritz A., 1995), cantidad que se sustrae de las emisiones de los procesos de combustión de la planta. Hay que reseñar que la absorción de CO<sub>2</sub> es pequeña, puesto que la cantidad de agua residual de la planta también lo es: 0,068 kg/kg de fibrocemento.

Los datos de inventario utilizados en este estudio proceden únicamente de la compañía suiza Eternit AG, por lo que los resultados obtenidos deben considerarse como una aproximación al impacto de este producto.

Las sustancias que más contribuyen al impacto en energía incorporada son el petróleo (29%), el gas natural (23%), el carbón (17%) y el uranio (14%), requeridas principalmente (90%) en la fabricación previa de clínker con el que se produce el cemento portland utilizado en la planta. Por otra parte, los procesos que más contribuyen al potencial de calentamiento global y la puntuación única, son la incineración del fibrocemento al final de su vida útil (37% y 14% respectivamente) y la producción del clínker (34% y 9% respectivamente). En cuanto a la huella hídrica, el mayor impacto se debe al agua utilizada como materia prima del proceso (18%) y al consumo de agua necesario para la generación eléctrica en plantas termoeléctricas de carbón (12%) principalmente para cubrir el consumo eléctrico de procesos previos. Finalmente, las sustancias que más contribuyen a la puntuación única son el petróleo (20%), el gas natural (16%), las emisiones de NO<sub>x</sub> (11%) y las emisiones de CO<sub>2</sub> (8%), todas ellas producidas mayoritariamente en procesos previos. Conviene reseñar además que el 82% del impacto de las

sustancias cancerígenas se produce en la incineración del fibrocemento, debido a su alta toxicidad, Por ello, es preciso plantear otra disposición final más saludable.

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida			Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Disposición Final (incineración)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	10,87	0,33	0,34	11,54
	94,2%	2,8%	3,0%	
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	0,83	0,02	0,54	1,39
	59,5%	1,4%	39,1%	
Huella hídrica (l)	18,97	0,15	1,26	20,37
	93,1%	0,7%	6,2%	
Puntuación única (mPt)	39,87	1,76	11,59	53,23
	74,9%	3,3%	21,8%	

Tabla 3.20. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de tejado de fibrocemento

### 3.2.1.9. Medidas de ecoeficiencia propuestas para ladrillos, baldosas y tejas

Dentro de la cerámica estructural, las principales materias primas utilizadas son arcilla, desengrasantes que confieren la plasticidad adecuada a la mezcla y aditivos para permitir la coloración, reducir la expansión al incrementarse el nivel de humedad, etc. En general, los productos de cerámica estructural son completamente reciclables. De hecho, en muchas plantas, las piezas descartadas pasan a formar del atomizado que se utiliza para la fabricación de nuevos productos, cuyas propiedades se mantienen idénticas.

El sector de la cerámica estructural es un sector intensivo desde el punto de vista energético. El principal punto de consumo es el horno, donde se puede llegar a consumir hasta el 80% del consumo total de la planta de fabricación. El siguiente punto de consumo desde el punto de vista térmico es el secadero. Por todo ello, la fracción renovable del indicador de energía primaria es baja (5-8%) para la mayor parte de productos cerámicos.

El consumo de agua se produce en la fase de amasado y moldeo para dar a la arcilla la plasticidad suficiente para que al pasar al molde se consiga la forma deseada sin fracturas. La cantidad de agua que se introduce depende de la humedad con la que venga la arcilla de la cantera y de las condiciones climáticas a las que esté expuesta durante la fase de almacenamiento. Así, en verano se añade más agua que en invierno.

Las instalaciones son pequeños productores de residuos peligrosos (como filtros) procedentes de las operaciones de mantenimiento del proceso productivo. Asimismo pueden generarse aguas residuales que pueden tratarse interna (en ese caso el agua puede reutilizarse nuevamente en el proceso) o externamente y otros residuos no peligrosos como papel, cartón, palets rotos, etc.

El transporte se hace habitualmente por carretera si el destino es nacional, mientras que para destinos internacionales, dependiendo de la distancia y el trayecto, se utilizan distintos medios: carretera, ferrocarril y marítimo.

Las progresivas mejoras tecnológicas introducidas en los procesos de fabricación de los productos cerámicos han permitido reducir la cantidad de materiales utilizados, manteniendo la misma resistencia a la fractura. Tal es el caso de los

ladrillos perforados frente a los ladrillos macizos o de la paulatina reducción del espesor de las baldosas cerámicas hasta los 3-6 mm. Por ello, es importante que las empresas sigan investigando y experimentando en esta línea.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se proponen las siguientes medidas de mejora:

#### **Utilización de paja u otros aditivos biomásicos como elemento aligerante de ladrillos:**

La adición de paja como elemento aligerante en los ladrillos conlleva principalmente una fuerte reducción de las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub>, pudiendo llegar a compensarse totalmente las emisiones de la etapa de fabricación y obteniendo unas emisiones del ciclo de vida casi nulas, dependiendo del porcentaje añadido, que podría incrementarse en función de las especificaciones técnicas que deba cumplir el producto.

#### **Fabricación de baldosas cerámicas a partir de pasta roja en vez de pasta blanca:**

Tradicionalmente en España se ha utilizado pasta roja, que es el tipo de arcilla disponible en nuestro país. Sin embargo, la creencia extendida mediante marketing de que la pasta blanca, utilizada típicamente en la fabricación de gres porcelánico, confiere una mayor calidad y estética al producto, ha modificado esta tendencia, incrementando notablemente los impactos del transporte ya que la pasta blanca debe importarse de países remotos como Ucrania. En ese caso, el incremento se estima en 9,6 MJ-Eq y 0,57 kg CO<sub>2</sub>-Eq por cada kilogramo de baldosa, lo que supone multiplicar ambos impactos por un factor de 1,6 respecto a los valores obtenidos si la arcilla fuese de origen local.

En este sentido, conviene dejar claro que las baldosas elaboradas a partir de pasta roja presentan una resistencia y durabilidad similar que las elaboradas a partir de pasta blanca, especialmente para revestimientos de interiores.

#### **Recuperación de calor de los hornos de cocción para precalentar/secar los productos cerámicos a cocer:**

El calor sensible de los humos de los hornos puede utilizarse para precalentar y presecar las piezas entrantes al prehorno, para precalentar el aire de combustión mediante intercambio indirecto, o bien puede usarse directamente en el secadero si el horno es de gas. Adicionalmente en los hornos túnel se pueden aprovechar ciertos calores residuales, como el obtenido en el enfriamiento de la bóveda. Con todo ello se puede conseguir reducir aproximadamente un 8% el consumo del horno, lo que conlleva, considerando el ciclo de vida completo de los productos cerámicos, una reducción del 3-4% de la energía primaria y el potencial de calentamiento total.

#### **Sustitución de líneas de hornos Hoffmann por hornos túnel automáticos y continuos:**

El 34% de los hornos utilizados en la producción de cerámica estructural son hornos Hoffmann de operación discontinua y de menor rendimiento energético (55% PCI) que los hornos túnel continuos, cuyo rendimiento basado en el PCI puede alcanzar el 75%. Además la sustitución suele traducirse en un aumento de la calidad de los productos y en una reducción del coste de la mano de obra. El coste

de la sustitución para una planta de tamaño medio-grande se estima en 6 M€, obteniendo un aumento del rendimiento energético del horno del 20%, lo que se traduciría en una reducción del 8-10% de la energía primaria y el potencial de calentamiento en el ciclo de vida completo de los productos cerámicos.

#### **Instalación de quemadores de alta velocidad para precalentado en hornos túnel:**

Este tipo de quemadores hacen que la velocidad de salida de los gases de combustión supere los 130 m/s, produciendo una fuerte turbulencia en el horno, que homogeneiza la temperatura del producto cerámico a cocer, disminuyendo la duración del ciclo de cocción y reduciendo el consumo de combustible del horno hasta un 5%. Consecuentemente se obtendría una reducción del 2-3% de la energía primaria y el potencial de calentamiento en el ciclo de vida completo de los productos cerámicos.

#### **Instalación de centrales de cogeneración en las plantas cerámicas:**

Permite cubrir los consumos eléctricos en la planta, vendiendo los excedentes a la red, pudiendo cubrir además la demanda térmica de aire caliente para el secadero, actualmente satisfecha con generadores de aire caliente o con quemadores de aire a gas, la demanda del prehorno de aire/gases calientes habitualmente satisfecha con parte de la recuperación directa del horno y la demanda de vapor para el amasado de la arcilla, satisfecha normalmente mediante caldera.

La central de cogeneración estaría compuesta por motores alternativos o turbinas media/baja potencia alimentadas con gas natural, con una inversión de 450-900 €/kW. Se estima que la implantación de sistemas de cogeneración en la industria cerámica nacional conllevaría una reducción del 10% de la energía primaria total incorporada en los productos correspondientes.

#### **Secado y cocción cerámica asistida por microondas:**

Las microondas son una técnica emergente en fase de investigación que se ha implantado en algunas plantas en combinación con las técnicas convencionales para el secado y la cocción de los productos cerámicos. Los resultados experimentales apuntan numerosos beneficios, entre los que cabe citar: la considerable reducción del consumo de energía y emisiones en la cocción, la mejora de las propiedades mecánicas de los productos. Los mejores resultados del secado por microondas se han obtenido para piezas delgadas con formas simples.

#### **Uso de filtro de mangas o electrofiltros con adición de cal/bicarbonato en la salida de los gases de combustión de las plantas cerámicas:**

La instalación de estos equipos permite reducir las emisiones de fluoruros, cloruros y dióxido de azufre, procedentes de las materias primas, que actualmente no suelen ser tratadas. La adición de cal permite reducir el 90% del ácido fluorhídrico de los gases, el 5-10% del dióxido de azufre y en torno al 10% del ácido clorhídrico. La inversión asociada es de 102-126 k€ para el filtro de mangas y de 258-282 k€ para el electrofiltro, obteniendo una reducción en la puntuación única del Ecoindicador '99 del 7-10% en los productos cerámicos.



### **Disminución de partículas de polvo:**

La disminución de las partículas de polvo en la fabricación de productos cerámicos puede conseguirse mediante un mejor control de los sistemas de aspiración y depuración instalados y el uso de sistemas neumáticos de transporte interno en la planta. A modo de ejemplo, el control de partículas en la producción de baldosas cerámicas permitiría obtener una reducción del 71% en la puntuación única del Ecoindicador '99, no afectando obviamente a las restantes categorías de impacto (energía, huella de carbono y huella hídrica).

### **Recuperación de los hornos tradicionales de biomasa para la fabricación de ladrillos y tejas cerámicas en áreas rurales:**

Para conseguir una disminución de impactos en la fabricación de los ladrillos y tejas cerámicos se plantea la recuperación de los hornos tradicionales de leña en las zonas rurales. De este modo se conseguiría neutralizar prácticamente las emisiones de CO<sub>2</sub> en la etapa de fabricación y se podría recuperar una tradición, que sin poder entrar en competencia con los grandes fabricantes cerámicos, pudiera suministrar pequeños pedidos para las edificaciones del entorno local, generando actividad económica repartida a lo largo del territorio, sin generar impacto ambiental. La mejora afectaría sobre todo al potencial de calentamiento global y al indicador de puntuación única, tal como muestra la Tabla 3.21. Adicionalmente, se conseguiría aumentar la fracción renovable en la energía incorporada en la fabricación, que en el caso del ladrillo de arcilla aligerada pasaría del 52% al 90%, y en el caso de la teja cerámica, del 3% al 57%.

Categoría de impacto	Ladrillo	Ladrillo arcilla aligerada	Ladrillo silico-calcáreo	Teja cerámica
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	0,080 (-70,5%)	-0,127 (-3267%)	0,090 (-24,9)	0,119 (-70,6%)
Puntuación única (mPt)	12,454 (-22,2%)	17,204 (-21,7%)	9,054 (-12,1)	15,804 (-25,1%)

*Tabla 3.21. Evaluación del impacto total del ciclo de vida de productos cerámicos (1 kg) fabricados en hornos tradicionales de leña*

### **Reciclado total de los productos en obra al final de su vida útil:**

En general, la disposición de todos los productos analizados en este apartado en una planta de clasificación para su reciclado parcial conlleva unos impactos similares a los de su eliminación directa. Por ello, la disminución de impactos en la disposición final pasa forzosamente por su reciclado total en obra, tal como se observa en la Tabla 3.22. Esta opción obliga a los arquitectos a plantear nuevos diseños de los edificios con uniones y conexiones reversibles entre sus elementos constitutivos, de modo que sea posible su desensamblaje.

Categoría de impacto	Ladrillo	Ladrillo arcilla aligerada	Ladrillo silico-calcáreo	Baldosa cerámica	Baldosa de hormigón	Teja cerámica	Teja de hormigón	Tejado de fibrocemento
Energía incorporada total (MJ-Eq)	3,315 (-6,9%)	6,018 (-4%)	1,935 (-11,3%)	15,402 (-1,6%)	1,927 (-12,4%)	4,343 (-5,4%)	2,387 (-10,2%)	11,250 (-2,5%)
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	0,261 (-3,7%)	-0,014 (-246%)	0,110 (-8,3%)	0,847 (-1,2%)	0,279 (-3,8%)	0,396 (-2,5%)	0,259 (-4,1%)	0,851 (-38,8%)
Huella hídrica (l)	1,661 (-12,1%)	1,186 (-16,2%)	2,780 (-7,6%)	14,224 (-1,6%)	2,757 (-8,4%)	2,227 (-9,3%)	3,852 (-6,1%)	19,127 (-6,1%)
Puntuación única (mPt)	14,853 (-7,2%)	20,825 (-5,2%)	9,152 (-11,2%)	225,199 (-0,5%)	10,406 (-10,8%)	19,961 (-5,4%)	11,478 (-9,9%)	42,918 (-19,4%)

Tabla 3.22. Evaluación del impacto total del ciclo de vida en los distintos productos analizados (1 kg) suponiendo su reciclado total

Finalmente, para conseguir una disminución de impactos en la fabricación de tejas y baldosas a base de cemento (baldosa y teja de hormigón, teja de fibrocemento), la medida más efectiva es utilizar cemento producido a partir de un **clínker en el que se sustituyan parcialmente los combustibles fósiles por residuos procedentes de otras actividades**. De este modo se consigue un doble efecto: la valorización energética de un residuo y la disminución del uso de energía fósil. Esta medida se expondrá detalladamente en el apartado 3.2.3.

A partir de las medidas anteriores se puede obtener una primera aproximación a la caracterización del sector cerámico español (tanto de revestimiento como estructural) por medio de su curva Ahorro-Inversión.

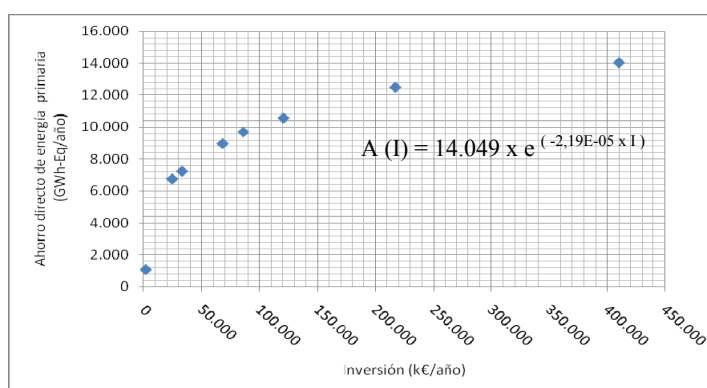


Figura 3.6. Curva Ahorro-Inversión del sector cerámico en España

En la Figura 3.6 se muestra el modelo obtenido, donde el ahorro está expresado en GWh-Eq de energía primaria por año, y la inversión anualizada en k€/año. Algunas medidas como el uso de pasta roja o el uso de paja como elemento aligerante tendrían un alto nivel de ahorro/inversión, mientras que la instalación de centrales de cogeneración generando un alto nivel de ahorro requeriría una inversión más alta, por lo que su ratio de ahorro/inversión sería sensiblemente menor. Se estima que el ahorro máximo potencial podría llegar a superar el 30% de la demanda de energía primaria total del sector.

## 3.2.2. Aislamientos térmicos

### 3.2.2.1. EPS Poliestireno expandido

La aplicación principal del poliestireno expandido (EPS) y del poliestireno extrusionado (XPS) es como aislamiento térmico de muros, cubiertas y forjados. La conductividad térmica de la espuma de poliestireno es de 0,035-0,04 W/mK, y su densidad es de 30 kg/m<sup>3</sup>.

El poliestireno es un polímero termoplástico producido a partir del etilbenceno, por lo que su uso contribuye a disminuir los recursos de petróleo, necesario para la obtención del benceno, y de gas natural, necesario para la obtención del etileno (Dones R., et al., 2007). El poliestireno (C(C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>)H-CH<sub>2</sub>-)<sub>n</sub> es una cadena de hidrocarburos con grupos fenil vinculados a cada uno de los segundos átomos de carbono (Maul J., 2000). El poliestireno expandido contiene un gas espumante, generalmente pentano, que se libera en el proceso de expansión.

Las materias primas para la producción de las distintas formas de poliestireno son el etileno y el benceno, producidos respectivamente mediante reformado de gas natural y cracking del petróleo. El estireno (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>-CH=CH<sub>2</sub>), monómero cuya polimerización da lugar a los distintos tipos de poliestireno, se produce a partir de dichas materias primas, dando lugar al etilbenceno como producto intermedio. Precisamente el 65% de la producción mundial de estireno se utiliza para fabricar poliestireno (James D.H., Castor W.M., 2000). En España la producción de EPS es de casi 34 kt/año, existiendo más de 50 plantas transformadoras de EPS.

La producción de estireno, tiene lugar, en el 85% de los casos, mediante deshidrogenación del etilbenceno en presencia de un catalizador de óxido de hierro. Como la reacción global es endotérmica (James D.H., Castor W.M., 2000), en el 75% de las plantas de estireno esta reacción de deshidrogenación se desarrolla adiabáticamente en múltiples reactores dispuestos en serie, y el calor de reacción es aplicado a la entrada de cada etapa.

El estireno resultante se compone normalmente de un 64% de estireno, un 32% de etilbenceno, un 2% de tolueno, un 1% de benceno y un 1% de otras sustancias. Por lo tanto, en un segundo paso, se requiere de una unidad de destilación para separar el estireno del resto de sustancias. Como dichas sustancias tienen puntos de ebullición muy diferentes, la destilación se suele hacer en tres pasos: primero se eliminan el benceno y el tolueno, que se suelen enviar a una planta de deshidrogenación, luego se elimina el etilbenceno, que se suele reciclar, y finalmente el estireno se destila de los alquitranes y polímeros restantes.

Las losas de espuma de poliestireno expandido consideradas en este estudio se producen por termoformado del poliestireno expandido, donde este material es calentado y se le da forma. En este proceso el pentano se evapora y se crea la espuma. El 4,15% del poliestireno expandido entrante al proceso no se aprovecha (Hischier R., 2007), por lo que se considera como residuo de este proceso.

Los inventarios utilizados para la producción de las losas de poliestireno expandido contienen información de la base de datos alemana ECOBIS (Starzner S., Würmer-Weiss P., 2000) y del IPCC (IPCC/TEAP, 2007). Los datos del proceso de termoformado provienen de 2 plantas suizas, mientras que los datos del proceso de producción del poliestireno se basan en datos extraídos de la Asociación Europea

de Fabricantes de Plásticos (PlasticsEurope) a partir de un estudio de 15 plantas europeas (Boustead I., 2005-07).

Sustancia	Unidad	Cantidad
Petróleo, crudo, en terreno	kg	1,17
Gas natural, en terreno	m <sup>3</sup>	1,01
Energía (poder calorífico superior), en forma de biomasa	MJ	0,39
Carbón, antracita, genérico, en terreno	kg	0,26
Agua, enfriamiento, origen natural genérico	m <sup>3</sup>	0,18
Carbón, lignito, en terreno	kg	0,03
Grava, en terreno	kg	0,03
Dióxido de carbono, en el aire	kg	0,02
Calcita, en terreno	kg	0,01

Tabla 3.23. Datos de inventario: principales materias primas para la fabricación de 1 kg de poliestireno expandido (valor de corte=1%)

Lógicamente el petróleo (para producir benceno) y el gas (para producir etileno) son las sustancias que más contribuyen a la energía incorporada (51% y 37% respectivamente), y a la puntuación única (44% y 31% respectivamente). En cuanto a los procesos, la producción del poliestireno expandido (previa a su termoformado) conlleva los mayores impactos en energía incorporada (90%), potencial de calentamiento global (47%), huella hídrica (92%) y puntuación única (82%). Además conviene destacar el proceso de incineración del polietileno al final de su vida útil que supone el 43% de las emisiones de CO<sub>2</sub>-Eq. Por otra parte, el 94% de la huella hídrica se debe a agua evaporada en procesos de enfriamiento.

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida			Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Disposición Final (incineración)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	104,89	0,33	0,27	105,49
	99,4%	0,3%	0,3%	
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	4,17	0,02	3,15	7,34
	56,8%	0,3%	42,9%	
Huella hídrica (l)	191,25	0,15	1,34	192,73
	99,2%	0,1%	0,7%	
Puntuación única (mPt)	375,06	1,76	24,46	401,28
	93,5%	0,4%	6,1%	

Tabla 3.24. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de poliestireno expandido

### 3.2.2.2. Espuma rígida de poliuretano

La producción de espuma de poliuretano -rígida o flexible- suele realizarse a través del denominado proceso directo (Dieterich D., 2000). En este proceso, todos los componentes se mezclan mediante una adición simultánea de todas las sustancias necesarias incluyendo catalizadores y auxiliares. Por tanto, en este proceso no se produce un pre-polímero intermedio. No obstante, este proceso directo exige mayores tasas de reacción entre las distintas sustancias, lo que puede lograrse mediante la selección de los catalizadores adecuados. Otro punto importante es que para el inicio de la reacción se necesita una temperatura bastante baja (alrededor de 20°C) sin sobrepasar en ningún caso los 50°C.

Para la fabricación de 1 kg de espuma rígida de poliuretano se necesitan las siguientes materias primas: 0,616 kg de difenilmetano isocianato (MDI), 0,389 kg de polioliol y 0,054 kg de pentano (Boustead I., 2005), si bien estas cantidades pueden variar en función de las especificaciones del producto final deseado. Se

asume que todas estas sustancias se transportan a granel, por carretera, una distancia de 200 km.

El consumo eléctrico del proceso asciende a 0,417 kWh/kg de producto final. En el proceso se genera una pequeña emisión de pentano (0,003 kg/kg, que se aprovecha internamente como materia prima del proceso) y se produce un residuo de espuma de poliuretano del 2% aproximadamente (Boustead I., 2005).

Sustancia	Unidad	Cantidad
Energía (poder calorífico superior), en forma de biomasa	MJ	1,78
Gas natural, en terreno	m <sup>3</sup>	1,11
Cloruro de sodio, en terreno	kg	1,07
Petróleo, crudo, en terreno	kg	0,81
Carbón, antracita, genérico, en terreno	kg	0,40
Agua, enfriamiento, origen natural genérico	m <sup>3</sup>	0,27
Calcita, en terreno	kg	0,24
Grava, en terreno	kg	0,08
Carbón, lignito, en terreno	kg	0,06
Agua, origen natural genérico	m <sup>3</sup>	0,06
Arcilla genérica, en terreno	kg	0,02
Hierro, 46% en mineral, 25% en mineral crudo, en terreno	kg	0,02
Agua, río	m <sup>3</sup>	0,02
Dióxido de carbono, en el aire	kg	0,02

Tabla 3.25. Datos de inventario: principales materias primas para la fabricación de 1 kg de espuma rígida de poliuretano (valor de corte=1%)

Los polioles utilizados para la fabricación del poliuretano son polioles-poliéter, que se producen por alcoxilación de alcoholes (como el etileno, el propileno, etc.) y epóxidos (como el óxido de propileno o el óxido de etileno). Las principales materias primas necesarias para la producción de polioles son: petróleo (0,802 kg/kg), gas natural (0,915 m<sup>3</sup>N/kg) y cloruro de sodio (1,96 kg/kg).

El MDI es un isocianato orgánico utilizado también como materia prima para la fabricación de poliuretano (Boustead I., 1997). En este caso, las principales materias primas utilizadas para la fabricación de MDI son: petróleo (0,637 kg/kg), gas natural (1,16 m<sup>3</sup>N/kg), cloruro de sodio (0,517 kg/kg) y azufre (3,65e-03 kg/kg).

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida			Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Disposición Final (incineración)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	102,08 98,4%	0,33 0,3%	1,38 1,3%	103,78
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	4,30 63,3%	0,02 0,3%	2,47 36,4%	6,79
Huella hídrica (l)	346,66 98,8%	0,15 0,0%	4,18 1,2%	350,98
Puntuación única (mPt)	370,79 91,5%	1,76 0,4%	32,51 8,0%	405,05

Tabla 3.26. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de espuma rígida de poliuretano

Los procesos de mayor impacto son la producción de las materias primas utilizadas en la fabricación del poliuretano: el MDI y el polioliol, debido a la gran cantidad que demandan de gas (42% de la energía incorporada total) y petróleo (37% de la energía incorporada total). La producción de MDI supone el 54% de la energía

incorporada, el 37% de las emisiones de CO<sub>2</sub>-Eq, el 57% de la huella hídrica y el 49% de la puntuación única. Por su parte, el polyol representa el 34% de la energía incorporada, el 21% de las emisiones de CO<sub>2</sub>-Eq, el 39% de la huella hídrica y el 34% de la puntuación única. Otro proceso a destacar es la incineración del poliuretano al final de su vida útil que supone el 36% de las emisiones de CO<sub>2</sub>-Eq y el 8% de la puntuación única.

### 3.2.2.3.Lana de roca

La lana de roca es un tipo de lana mineral, que se fabrica a partir de rocas volcánicas desde el año 1937. En España se fabrican actualmente más de 175 kt/año de lanas minerales. Los principales recursos naturales utilizados para su fabricación son el basalto, la dolomita y la piedra caliza. La lana de roca contiene un mínimo del 96% de fibras minerales con estructura no cristalina producidas artificialmente del basalto natural, la dolomita y lana de roca reciclada. Además contiene un 0,5-3% en peso de resina fenólica, en función de las especificaciones deseadas para el producto, y cerca de un 0,2% de aceite mineral para aumentar las características hidrofóbicas del producto final y disminuir la cantidad de polvo (Flumroc , 2002).

Sustancia	Unidad	Cantidad
Energía (poder calorífico superior), en forma de biomasa	MJ	2,26
Basalto, en terreno	kg	0,53
Carbón, antracita, genérico, en terreno	kg	0,47
Calcita, en terreno	kg	0,43
Grava, en terreno	kg	0,29
Dióxido de carbono, en el aire	kg	0,20
Gas natural, en terreno	m <sup>3</sup>	0,15
Petróleo, crudo, en terreno	kg	0,11
Arcilla genérica, en terreno	kg	0,08
Carbón, lignito, en terreno	kg	0,06
Aluminio, 24% en bauxita, 11% en mineral crudo, en terreno	kg	0,04
Hierro, 46% en mineral, 25% en mineral crudo, en terreno	kg	0,03
Agua, enfriamiento, origen natural genérico	m <sup>3</sup>	0,01
Agua, pozo	m <sup>3</sup>	0,01

Tabla 3.27. Datos de inventario: principales materias primas para la fabricación de 1 kg de lana de roca (valor de corte=1%)

La roca basáltica se licua en un horno de fundición cilíndrico vertical (de cubilote) a una temperatura de 1.500 °C utilizando habitualmente coque de hulla como combustible. La “lava” obtenida pasa por un rotor que, mediante centrifugación, consigue estirar el material y convertirlo en fibras de 4 µm de diámetro. Las fibras se impregnan con resinas fenólicas y aceites minerales y se endurecen posteriormente en un horno especial. Por último, la lana de roca se corta al tamaño deseado mediante guillotinas y se enrolla para su embalaje y almacenamiento.

Los datos de inventario utilizados en este análisis provienen de la planta suiza “Flumroc AG” e incluyen los procesos de fundición, formación, recogida, endurecimiento y curado de las fibras así como su embalaje, los transportes de materias primas y los transportes internos en planta y la propia infraestructura de la planta. Para producir 1 kg de lana de roca se consideran principalmente las siguientes materias primas: 0,528 kg de basalto, 0,212 kg de polvo de piedra caliza, 0,19 kg de cemento Portland, 0,141 kg de polvo de bauxita, 0,1555 kg de lana de roca y polvo de lana de roca reciclados, 0,0591 kg de dolomita y 0,0697 kg de resinas fenólicas. Como fuentes energéticas se utilizan coque de hulla, gas o

gasóleo y electricidad. En cuanto a los transportes de materias primas se considera el transporte del carbón (500 km en ferrocarril), del basalto (420 km en barco, 70 km en ferrocarril y 50 km en camión), de las resinas fenólicas y otros agentes (un promedio de 500 km en tren) y del resto de materias primas (entre 15 y 20 km en camión).

El 30% de la energía incorporada del producto final se produce en la obtención de coque de hulla, seguida de la producción de resinas fenólicas (18%) y la producción eléctrica para su consumo en planta (13%). Las sustancias que más contribuyen a la energía incorporada son el carbón (34%), el gas (22%) y el petróleo (21%). En cuanto al potencial de calentamiento global, la mayor contribución se debe a los procesos de combustión en planta (53%). Por otra parte, la mayor contribución a la huella hídrica está en la producción de las resinas fenólicas (16%) y la producción eléctrica (15%) debido al agua evaporada en las centrales de carbón. Globalmente el agua evaporada en todos los procesos de enfriamiento supone el 42% de la huella hídrica. En cuanto a la puntuación única, los procesos de mayor contribución son la obtención del basalto (34%) y de las resinas (11%), y las sustancias que más contribuyen son las partículas emitidas (44%), el gas (12%) y el petróleo (12%).

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida			Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Disposición Final (vertedero)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	25,82 97,8%	0,33 1,2%	0,25 0,9%	26,39
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	1,48 98,1%	0,02 1,3%	0,01 0,7%	1,51
Huella hídrica (l)	32,01 98,8%	0,15 0,5%	0,23 0,7%	32,38
Puntuación única (mPt)	143,66 97,4%	1,76 1,2%	2,08 1,4%	147,50

Tabla 3.28. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de lana de roca

#### 3.2.2.4. Corcho

Los bosques de alcornoques, de los que se obtiene el corcho, están localizados principalmente en países Mediterráneos. Se estima que, a nivel mundial, cubren una extensión de 2,2 millones de hectáreas, de las cuales el 30% se localiza en Portugal, el 21% en Argelia, el 20% en España, y el 16% en Marruecos, el 5% en Francia y el 4% en Italia y Túnez respectivamente (De Oliveira M.A., 1991).

Los alcornoques son despojados de su corteza por vez primera a los 25 años. El "corcho virgen" de la primera extracción suele ser de mala calidad, y por tanto, de menor valor. A partir de este momento, la corteza se retira en intervalos de aproximadamente 10 años hasta que el árbol alcanza los 200 años de antigüedad.

La producción media mundial es de alrededor de 150 kg de corcho por hectárea. Sin embargo, en países como Portugal puede ascender a 2.000-2.500 kg/ha. Esta variabilidad, puede deberse a las condiciones climáticas, la densidad de los bosques, etc.

La recolección del corcho se suele realizar manualmente con cuchillos especiales y hachas. Después de 200 años, los alcornoques se cortan mediante moto-sierras. La madera obtenida es de calidad bastante pobre y, por lo general, no se utiliza en la

construcción. Por cada m<sup>3</sup> de madera, se recolectan 422 kg de corcho (Werner F., et al., 2007; Althaus H.J., Ritscher K., 2001). A pesar de que el fruto del alcornoque, la bellota, es ampliamente valorado y utilizado como alimento porcino, se ha despreciado en este estudio.

El corcho recolectado se almacena en las cercanías de los bosques alrededor de 2 años para su estabilización antes de ser transportado a planta. A partir de ahí se transporta a la planta de fabricación de losas de corcho, donde es triturado y tamizado. La suciedad (polvo, barro, etc.) extraída se utiliza como combustible en el horno de la planta. Los granos de corcho se prensan junto con las resinas aglomerantes para formar la losa. Por último, la losa se lija y se almacena. El polvo del lijado se quema igualmente en el horno, que demanda una energía térmica total de 6 MJ/kg de losa producida, no requiriendo el apoyo de ningún combustible fósil, y el papel de lija se lleva a un vertedero.

En este estudio, se han considerado, por kg de losa de corcho, las siguientes resinas: 56 g/ de resina de melamina-formaldehído, 56 g de resina de urea-formaldehído y 28 g de resina fenólica. No obstante, las resinas utilizadas podrían cambiar, dependiendo de las propiedades deseadas para el producto.

El consumo eléctrico en planta se estima en 1 kWh/kg de losa de corcho y el transporte se estima en 50 km para las resinas y 320 km para el corcho, todo transportado en camión.

Además de las emisiones del horno, hay algunas emisiones de partículas de polvo en la manipulación de la materia prima y de formaldehídos de las resinas utilizadas, que en total se estiman en 1,4E-04 kg/kg de losa de corcho.

Los datos de inventario utilizados provienen de un estudio realizado por EMPA para un productor de Portugal (Althaus H.J., Ritscher K., 2001).

Sustancia	Unidad	Cantidad
Energía (poder calorífico superior), en forma de biomasa	MJ	26,63
Dióxido de carbono, en el aire	kg	2,43
Grava, en terreno	kg	0,51
Gas natural, en terreno	m <sup>3</sup>	0,28
Carbón, antracita, genérico, en terreno	kg	0,18
Petróleo, crudo, en terreno	kg	0,10
Carbón, lignito, en terreno	kg	0,07
Agua, enfriamiento, origen natural genérico	m <sup>3</sup>	0,02
Calcita, en terreno	kg	0,02
Hierro, 46% en mineral, 25% en mineral crudo, en terreno	kg	0,02
Arcilla genérica, en terreno	kg	0,02

Tabla 3.29. Datos de inventario: principales materias primas para la fabricación de 1 kg de corcho (valor de corte=1%)

A pesar de que la mayor parte de la energía incorporada en este producto es de origen renovable (la fracción renovable es del 53,7%), centrándose en la componente fósil, el proceso que más contribuye es la fabricación de las resinas utilizadas (59,3% de la energía fósil) y la electricidad utilizada en planta (32% de la energía fósil). En cuanto al potencial de calentamiento global las emisiones asociadas a la electricidad consumida en planta y la fabricación de las resinas ascienden a 1,114 kg CO<sub>2</sub>-Eq, que se ven compensadas por la fijación previa de CO<sub>2</sub> en el corcho. Más de la mitad de la huella hídrica (51%) se debe al consumo de agua necesario para la producción eléctrica que abastece la planta, mientras que



el 40% se debe a los procesos de producción de las resinas, que además supone la mayor aportación a la puntuación única (35% del total).

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida			Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Disposición Final (incineración)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	50,99	0,33	0,20	51,52
	99,0%	0,6%	0,4%	
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	-0,69	0,02	1,47	0,81
	-31,5%	0,9%	67,6%	
Huella hídrica (l)	29,02	0,15	1,17	30,34
	95,6%	0,5%	3,9%	
Puntuación única (mPt)	133,35	1,76	10,83	145,94
	91,4%	1,2%	7,4%	

Tabla 3.30. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de corcho

### 3.2.2.5. Fibra de celulosa reciclada

Para producir 1 kg de aislante de fibras de celulosa recicladas, se tritura 0,801 kg de papel reciclado y, para mejorar la resistencia al fuego las fibras, se mezcla con 0,0887 kg de ácido bórico y 0,109 kg de bórax. La mezcla pasa por un molino, donde cada fibra del papel es separada e impregnada con boro. La suciedad de las fibras es eliminada mediante un ciclón, generando un residuo sólido de 0,0112 kg/kg de producto, y por último, se empaqueta el producto final en bolsas de papel (Richter K., et al., 1995).

Las fibras de celulosa utilizadas como aislamiento térmico en los edificios tienen típicamente una densidad de 50 kg/m<sup>3</sup> y una conductividad térmica de 0,04 W/mK.

Sustancia	Unidad	Cantidad
Energía (poder calorífico superior), en forma de biomasa	MJ	2,26
Bórax, en terreno	kg	0,23
Colemanita, en terreno	kg	0,22
Dióxido de carbono, en el aire	kg	0,20
Grava, en terreno	kg	0,11
Gas natural, en terreno	m <sup>3</sup>	0,08
Carbón, antracita, genérico, en terreno	kg	0,05
Carbón, lignito, en terreno	kg	0,04
Petróleo, crudo, en terreno	kg	0,04
Agua, enfriamiento, origen natural genérico	m <sup>3</sup>	0,01

Tabla 3.31. Datos de inventario: principales materias primas para la fabricación de 1 kg de fibra de celulosa (valor de corte=1%)

Los consumos energéticos en planta suelen ser reducidos: 0,102 kWh eléctricos/kg, 0,018 kWh de gas natural/kg y 0,003 kWh de gasóleo/kg para transportes internos en planta. Además al aplicar las fibras de celulosa como aislante en los edificios hay un pequeño consumo de electricidad (1,85E-04 kWh/kg) para el soplado (Eyerer P., Reinhardt H.W., 2000), que se considera en el inventario para permitir una adecuada comparación de las fibras de celulosa con otros materiales aislantes como la espuma de poliestireno, la lana de roca, etc. En cuanto a las necesidades de transporte de las materias primas se realiza principalmente por ferrocarril, suponiendo 600 km para los productos químicos y 100 km para el papel.

Los datos de inventario utilizados en este estudio se basan en una única planta de un productor suizo, despreciando las pequeñas emisiones de partículas de polvo generadas en la manipulación de las fibras y las aguas residuales del proceso, debido a su poca relevancia. En cualquier caso, debido a la sencillez del proceso se considera que la calidad de los datos es suficiente.

La fabricación de los productos químicos es responsable de la mayor parte de los impactos. En energía incorporada, el 32% del impacto se debe a la producción de bórax y el 12% a la producción de ácido bórico. Además el 21% se debe al papel Kraft utilizado en el embalaje, si bien debido a su origen biomásico este papel se limita a incrementar la fracción renovable. Las sustancias más representativas son el gas natural (30%) y la biomasa (21%). En cuanto a las emisiones de CO<sub>2</sub>-Eq, destacar que el 81% se producen en la incineración, -por lo que considerando la composición química del producto se trata de una emisión de CO<sub>2</sub> biogénico- y el 10% en la producción de bórax. En cuanto a la huella hídrica, el 40% se debe a la producción de ácido bórico, el 27% a la producción de papel Kraft y el 12% a la producción de bórax. Por último, en la puntuación única, el proceso de más impacto es la incineración del producto (28%), seguido de la producción de bórax y ácido bórico, con un 24% y 18% de contribución respectivamente.

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida			Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Disposición Final (incineración)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	9,82	0,33	0,34	10,49
	93,6%	3,1%	3,3%	
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	0,32	0,02	1,49	1,83
	17,7%	1,1%	81,2%	
Huella hídrica (l)	19,17	0,15	1,47	20,79
	92,2%	0,7%	7,1%	
Puntuación única (mPt)	40,35	1,76	16,09	58,21
	69,3%	3,0%	27,7%	

Tabla 3.32. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de fibra de celulosa

### 3.2.2.6. Lana de Madera

La lana de madera se produce principalmente a partir de virutas residuales de explotaciones forestales y madereras. Las virutas suelen tener un espesor de 0,03-0,5 mm y 2 mm de ancho. Las virutas entran en la planta con una humedad del 70% por lo que se secan con aire hasta conseguir una humedad del 20% aproximadamente.

La lana de madera se utiliza como material de embalaje y como materia prima para fabricar tableros de lana de madera. Dichos tableros tienen una densidad baja (360-570 kg/m<sup>3</sup>) y se usan como aislamiento térmico de muros, suelos y cubiertas debido a su baja conductividad térmica (0,08-0,14 W/mK)

Sustancia	Unidad	Cantidad
Energía (poder calorífico superior), en forma de biomasa	MJ	18,65
Dióxido de carbono, en el aire	kg	1,66
Grava, en terreno	kg	0,05
Carbón, antracita, genérico, en terreno	kg	0,01

Tabla 3.33. Datos de inventario: principales materias primas para la fabricación de 1 kg de lana de madera (valor de corte=1%)

Los datos de inventario considerados en este estudio proceden de una única planta de producción en Suiza. Se incluyen todos los procesos de producción de la lana de madera desde las virutas residuales entrantes ( $2,12E-03$  m<sup>3</sup>/kg de lana), el secado con aire, la compresión del aire, y los transportes tanto internos como externos a la planta. El consumo eléctrico en la planta es tan solo de 0,0592 kWh/kg de lana y se supone que el transporte de las virutas hasta la planta se hace por tren cubriendo una distancia de 100 km.

Como se puede comprobar en la Tabla 3.34, los impactos son bajos. Casi la totalidad de la energía incorporada corresponde a las virutas de madera de origen biomásico. El balance en emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> es prácticamente nulo, exceptuando las pequeñas emisiones desde la obtención de las virutas hasta que la lana de madera sale de la planta y se instala. La reducida huella hídrica se debe al agua requerida para la producción eléctrica necesaria para abastecer la planta (34%) y para el proceso de incineración (43%), que es también el principal impacto en puntuación única.

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida			Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Disposición Final (incineración)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	19,74	0,33	0,20	20,27
	97,4%	1,6%	1,0%	
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	-1,60	0,02	1,70	0,12
	-48,1%	0,6%	51,3%	
Huella hídrica (l)	1,44	0,15	1,17	2,76
	52,2%	5,3%	42,5%	
Puntuación única (mPt)	-2,17	1,76	10,83	10,42
	-14,7%	11,9%	73,4%	

Tabla 3.34. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de lana de madera

### 3.2.2.7. Lana de oveja

La lana obtenida de la oveja es una fibra natural con buenas cualidades aislantes (su conductividad térmica es inferior a 0,04 W/mK) que ha sido utilizada por todas las civilizaciones a lo largo de la historia de la humanidad. Sin embargo, en nuestra sociedad su uso se está reduciendo cada vez más.

El inventario mundial de ganado ovino ascendía en el año 2003 a 1.024 millones de cabezas, destacando países como China con 143,8, Australia con 98,2, India con 59 y Nueva Zelanda con 39,2 millones de cabezas (ASI, 2006). En cuanto a la producción de lana, los 3 países a la cabeza en el año 2006 eran Australia con 519.660 t, China con 388.777 t y Nueva Zelanda con 209.250 t (FAO, 2006).

Para realizar un análisis de ciclo de vida de la lana de oveja, los únicos datos de inventario disponibles son los de *Ecoinvent*, procedentes todos ellos de diversas fuentes bibliográficas de Estados Unidos (NREL, 2006; USDA, 2006; AVNA, 2006; Wells et al, 2000), que consideran la lana de oveja a la salida de una granja. Tal como se va a demostrar a continuación, estos datos son difícilmente extrapolables para su uso en Europa, y más concretamente en España.

Los datos de *Ecoinvent* consideran dentro de los límites del sistema aspectos como las infraestructuras necesarias para el ganado (cobertizos, maquinaria y diversos equipamientos), la cría de las ovejas requiriendo ocupación del terreno, su alimentación con piensos y pastos así como el agua consumida, los fertilizantes

utilizados en las zonas de pasto, las emisiones de las operaciones de la maquinaria agrícola en dichas zonas, e incluso el vertido de fosfato a las aguas subterráneas.

Una oveja es capaz de producir 62,8 kg/año de carne y 4,2 kg/año de lana y que el 43% de las ovejas son sacrificadas después del primer año y por tanto sólo producen carne (NREL, 2006). A la hora de repartir los impactos entre los dos productos obtenidos de la oveja, se considera que la producción de carne representa sólo el 35,1% del impacto y la producción de lana el 64,9% restante. Este reparto no es realista para países como España, donde, en muchas zonas, la lana producida actualmente no tiene ningún uso y simplemente se desecha.

En lo que respecta a la alimentación, se considera que el 20% de las ovejas se crían en pastos intensivos (Wells, et al., 2000) que requieren diversas operaciones de labranza y uso de fertilizantes tales como el nitrato de amonio (1,37 kg/cabeza año), el superfosfato triple (0,46 kg/cabeza año), fertilizante de potasio (0,69 kg/cabeza año) y fertilizante cálcico (18,26 kg/cabeza año). Asimismo se consumen 2.071 litros de agua por cabeza y año (NREL, 2006) así como diversos piensos compuestos por harina de soja, grano de maíz, cloruro de sodio que suman un total de 79,1 kg/cabeza año. Se supone que la harina de soja y grano de maíz se transportan por ferrocarril (800 km) y camión (400 km); mientras que los fertilizantes y otros compuestos se transportan por camión (50 km).

Respecto al uso del terreno se estima que cada oveja necesita 809 m<sup>2</sup>/año, lo que supone 12,4 ovejas por hectárea (AVNA, 2007).

Las emisiones al aire se deben a los fertilizantes minerales, así como a la propia oveja y su estiércol. De este modo, se estima que cada oveja conlleva una emisión de 7,96 kg CH<sub>4</sub> procedentes de la fermentación entérica, 0,711 kg CH<sub>4</sub> de su estiércol, 0,222 kg N<sub>2</sub>O procedentes de los fertilizantes, 0,0355 kg N<sub>2</sub>O de su estiércol, 3,4 kg NH<sub>3</sub> de la fermentación entérica y estiércol y 0,033 kg NH<sub>3</sub> de los fertilizantes.

Para su uso como aislamiento térmico en edificios, la lana de oveja obtenida en las granjas, debe someterse a un tratamiento con sal de bórax para aumentar su durabilidad y resistencia al fuego, así como evitar el ataque de insectos, polillas, etc. Por término medio, cada kilogramo de aislante térmico de lana está formado por un 91% de lana de oveja, 5% de polvo de bórax, 4% de caucho natural y un 3% de agua. Además se requiere un pequeño consumo de electricidad y gas natural (en total, inferior a 0,06 kWh/kg de lana) para el calentamiento de los productos aplicados sobre la lana.

Añadiendo estos elementos al inventario americano de “lana de oveja en granja” se hace una estimación de los posibles impactos. Sin embargo, los límites establecidos en los datos del inventario americano y las distintas suposiciones realizadas en el mismo hacen que los impactos obtenidos sean muy elevados y absolutamente irreales, tal como se puede apreciar en la primera columna de la Tabla 3.35.

El proceso que más contribuye a los impactos mostrados en la tabla es la infraestructura del cobertizo para las ovejas, que supone el 81% de la energía incorporada, el 53% de las emisiones de CO<sub>2</sub>-Eq, el 93% de la huella hídrica y el 43% de la puntuación única. Otro proceso a destacar es la fabricación de piensos, que contribuye al 15% de la energía incorporada y al 13% de la puntuación única.

En la Tabla 3.35 se evalúan los impactos únicamente de la etapa de fabricación de la lana, dejando progresivamente fuera de los límites del sistema: la infraestructura del cobertizo, los piensos utilizados y su transporte, los fertilizantes, maquinaria y emisiones asociadas, así como la transformación de praderas a pastos de uso intensivo. No obstante, incluso eliminando todos estos aspectos del análisis, los impactos siguen siendo muy poco realistas.

Según la información proporcionada por los fabricantes, como Sheep Wool Insulation (fabricante irlandés), la energía incorporada de origen no-renovable es de tan sólo 2,7 MJ-Eq por kilogramo de lana producido, lo cual contrasta con los valores de la Tabla 3.35 y demuestra claramente el error cometido al intentar extrapolar los inventarios americanos.

Categoría de impacto	1) Sistema inicial	2)=1) sin cobertizo	3)=2) sin piensos ni transportes	4)=3) sin fertilizantes, maquinaria ni emisiones	5) =4) sin transformación de praderas a pastos
Energía incorporada total (MJ-Eq)	1.412,32	267,87	45,19	26,48	26,48
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	78,43	37,16	42,63	31,20	31,20
Huella hídrica (l)	1.117,83	78,60	26,84	5,21	4,96
Puntuación única (mPt)	16.497,13	9.394,42	7.196,58	6.979,38	1.820,51

Tabla 3.35. Evaluación del impacto del ciclo de vida en la etapa de fabricación de 1 kg de lana de oveja con distintos límites del sistema

Por tanto, como conclusión, hay que remarcar que en la actualidad no existen inventarios con suficiente fiabilidad y precisión para realizar un estudio de análisis de ciclo de vida de la lana de oveja como aislante térmico de edificios. Tal como se ha demostrado, los inventarios de *Ecoinvent* no se adaptan ni a la realidad europea ni a la española. Por ello, debería desarrollarse un trabajo de campo en empresas productoras de este tipo de aislante que permitiera obtener unos datos de inventario fiables.

### 3.2.2.8. Medidas de ecoeficiencia propuestas para aislamientos térmicos

Tal como ha quedado demostrado la utilización de aislantes termoplásticos, tales como el poliestireno expandido y la espuma rígida de poliuretano conlleva un alto impacto energético y ambiental, debido a los altos consumos de combustibles fósiles y los productos químicos necesarios para su fabricación. De hecho, su fracción renovable en el indicador de energía incorporada es despreciable (1-3%). Además, su disposición final en incineradoras, si bien permite recuperar algo de energía, aumenta significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub> de dichos productos, que se estiman en 6,8-7,3 kg CO<sub>2</sub> por cada kilogramo de producto.

Por todo ello, se proponen las siguientes medidas de mejora:

**Fomentar el uso de materiales aislantes naturales y/o reciclados:**

En contraposición con los aislantes termoplásticos, los materiales aislantes naturales y/o reciclados, como el corcho, la fibra de madera, la fibra de celulosa reciclada o la lana de oveja, conllevan una alta fracción renovable en su energía incorporada (53,7% en el caso del corcho, 92,4% en el caso de la lana de madera, etc.) y permiten una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> del 75-98%, pudiéndose llegar a convertirse en sumideros de CO<sub>2</sub>, en caso de incorporar mejoras en sus procesos productivos, como el cambio en su disposición final, reciclando dichos productos en vez de incinerarlos.

Sin embargo, a día de hoy, el uso de materiales aislantes en la edificación se ve limitado por la falta de proveedores que garanticen un suministro a mediana o gran escala, su mayor precio, al no existir economías de escala, y por el desconocimiento y los prejuicios existentes en diseñadores, promotores, constructores y usuarios.

Por todo ello, desde las Administraciones se debería promover el uso de estos materiales, a través de nuevas disposiciones normativas e incentivos que permitieran el desarrollo de una industria potente de este tipo de materiales, venciendo las barreras anteriormente mencionadas.

**Reciclado de los materiales aislantes:**

Los materiales aislantes podrían extraerse en la demolición del edificio, y ser reciclados para otros usos. Según los resultados del proyecto CICLOPE del Plan Nacional de I+D+i, con los actuales diseños de edificios podría reciclarse hasta un 60%, mientras que el resto iría, mezclado con los distintos materiales, a vertedero. No obstante, un diseño del edificio para su fácil desensamblaje permitiría aumentar dicho porcentaje.

El EPS puede ser reciclado mecánicamente. Mediante simple triturado, el EPS es mezclado con las perlas de materia prima e incorporado nuevamente al proceso productivo. El material resultante varía en el aspecto físico y determinadas propiedades mecánicas en función del porcentaje de reciclado que se incorpore al producto final. Otra opción sería reciclar el EPS para la obtención de granza de poliestireno reciclado, utilizable en diversas aplicaciones, desde la fabricación de perchas o cajas de CDs hasta mobiliario urbano.

Tal como muestra la Tabla 3.36, el reciclado del EPS contribuiría a disminuir el alto impacto en CO<sub>2</sub> asociado a su incineración. Respecto a los otros materiales, se observa que la disminución de impactos es mayor en aquellos materiales de origen biomásico (corcho y lana de madera), en los que se había considerado inicialmente la incineración como disposición final. De hecho, el reciclaje de estos materiales conllevaría una absorción neta de CO<sub>2</sub> en su vida útil.

En cuanto a la lana de roca, al ser un producto de origen mineral, libre de pesticidas y químicamente neutro, puede tener diversos usos. Por ejemplo, una vez triturada y mezclada con turba puede constituir un sustrato de cultivo utilizable para la producción de plantas (Riga P., et al., 2003).

En el caso de la espuma rígida de poliuretano, a día de hoy se hace necesaria una mayor investigación que permita disponer de tecnologías que faciliten su reciclado sin una pérdida de sus cualidades.

Categoría de impacto	EPS	Lana de roca	Corcho	Fibra de celulosa reciclada	Lana de madera
Energía incorporada total (MJ-Eq)	105,216 (-0,3%)	26,146 (-0,9%)	51,318 (-0,4%)	10,144 (-3,3%)	20,067 (-1%)
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	4,185 (-42,9%)	1,501 (-0,7%)	-0,667 (-182,7%)	0,344 (-81,2%)	-1,576 (-1368,8%)
Huella hídrica (l)	191,393 (-0,7%)	32,155 (-0,7%)	29,162 (-3,9%)	19,319 (-7,1%)	1,588 (-42,5%)
Puntuación única (mPt)	376,819 (-6,1%)	146,348 (-0,8%)	135,111 (-7,4%)	42,110 (-27,7%)	-0,408 (-103,9%)

Tabla 3.36. Evaluación del impacto total del ciclo de vida de distintos materiales aislantes (1 kg) suponiendo su reciclado total

### **Sustitución de resinas de urea-formaldehído y melamina-formaldehído por resinas naturales en el corcho:**

La sustitución de las resinas sintéticas, derivadas de productos petrolíferos y muy utilizadas actualmente en la fabricación del corcho debido a su secado más rápido y bajo coste, por resinas naturales cuyo impacto es nulo, permitiría reducir aún más los impactos de este producto, además de mejorar la calidad del aire interior de los edificios, y facilitar la creación de empleo y riqueza en áreas rurales.

Categoría de impacto	Corcho
Energía incorporada total (MJ-Eq)	11,11 (-53%)
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	0,26 (-67%)
Huella hídrica (l)	18,1 (-40%)
Puntuación única (mPt)	95 (-35%)

Tabla 3.37. Evaluación del impacto total del ciclo de vida del corcho (1 kg) utilizando resinas naturales

### **Aprovechamiento de calores residuales de los propios procesos de la planta o de los procesos de plantas próximas (metabolismo industrial):**

Para disminuir los impactos en la fabricación de la lana de roca se plantea el aprovechamiento de calores residuales de la propia planta. Los calores residuales del proceso se estiman en 6,54 MJ/kg de lana de roca producida. A modo de ejemplo, suponiendo un aprovechamiento del 50% (3,27 MJ/kg), mediante los correspondientes recuperadores de calor, se produciría una disminución significativa de los impactos, tal como muestra la Tabla 3.38.

En el caso de la fibra de celulosa reciclada, se ha valorado cuál sería la disminución de impactos, en caso de plantear una integración entre las plantas de fabricación del bórax y ácido bórico dentro de un polígono de industrias químicas en el que exista un adecuado metabolismo industrial y se aprovechen los calores residuales entre las distintas plantas. Supliendo con calores residuales del polígono industrial los

15,6 MJ que se requieren para los procesos térmicos en la fabricación del bórax y ácido bórico, los impactos en la fabricación de la fibra de celulosa serían aún más reducidos.

Categoría de impacto	Fibra de celulosa reciclada	Lana de roca
Energía incorporada total (MJ-Eq)	8,263 (-21,2%)	21,796 (-17,4%)
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	1,707 (-6,8%)	1,050 (-30,5%)
Huella hídrica (l)	19,970 (-3,9%)	31,382 (-3,1%)
Puntuación única (mPt)	51,194 (-12%)	138,295 (-6,2%)

Tabla 3.38. Evaluación del impacto total del ciclo de vida de fibra de celulosa y lana de roca (1 kg) mediante el aprovechamiento de calores residuales

La curva aproximada de Ahorro-Inversión para el sector de aislamientos térmicos, obtenida a partir de las medidas anteriores se muestra en la siguiente figura.

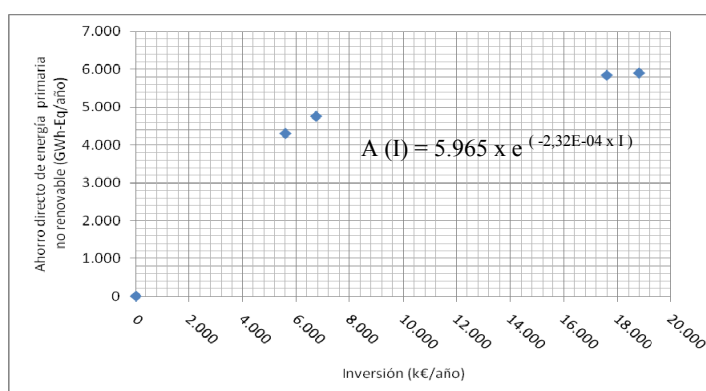


Figura 3.7. Curva Ahorro-Inversión del sector de los aislamientos térmicos en España

Debido a la imposibilidad de obtener datos con suficiente nivel de desagregación sobre el nivel de producción de los distintos tipos de aislantes estudiados, la curva Ahorro-Inversión obtenida en este caso debe entenderse como una estimación preliminar.

El impulso a una nueva industria de los aislamientos naturales que fuese sustituyendo progresivamente a la industria de los aislantes termoplásticos proporciona una ratio elevada de ahorro/inversión, en contraposición al reciclaje de los materiales aislantes termoplásticos, cuyas dificultades técnicas, conllevan altas inversiones, produciendo una disminución en dicha ratio.

Como se puede observar en la Figura 3.7, para realizar una evaluación más apropiada, en este sector se ha cuantificado el ahorro en la fracción no-renovable de la energía primaria, debido a la elevada fracción renovable en la energía primaria incorporada en los aislantes naturales.



### 3.2.3.Cemento y hormigón

La producción mundial de cemento ascendió en el año 2008 a 2.900 millones de toneladas, con un incremento del 4,7% respecto al año anterior. El 56% de la producción se concentra en China e India, mientras que España supone el 1,9% de la producción mundial (U.S. Geological Survey, 2009). Actualmente el sector cementero español está constituido por 9 grupos empresariales, 13 empresas y 36 fábricas distribuidas en las distintas Comunidades Autónomas. Según las asociaciones del sector, el consumo de energía primaria de esta industria en España se estima en 4,58 Mtep/año, destinándose más de la mitad del cemento producido a la edificación.

País	Producción de cemento (Mt)		Capacidad de Producción de clínker (Mt)	
	2007	2008	2007	2008
China	1.350	1.450	1.300	1.400
India	170	175	160	170
Estados Unidos	96,5	89,1	102	104
España	54,5	55	42	42
TOTAL mundial	2.770	2.900	2.700	2.800

Tabla 3.39. Producción de cemento y clínker en los años 2007 y 2008. Fuente: U.S. Geological Survey, 2009

Los datos de inventario utilizados para el estudio del cemento y hormigón proceden de los resultados de un análisis de ciclo de vida realizado en Suiza basado en 4 plantas de grava, 8 fábricas de cemento y 6 plantas de hormigón (Künniger et al., 2001), que se contrastan con las principales características del sector cementero español.

#### 3.2.3.1.Cemento

El cemento es un conglomerante hidráulico, de carácter no metálico e inorgánico, que al mezclarse con agua forma una pasta que fragua y se endurece por hidratación. Después del endurecimiento, conserva su fuerza y estabilidad incluso bajo el agua. El endurecimiento se debe principalmente a la formación de hidratos de silicato de calcio.

A lo largo de los últimos años, la industria del cemento está haciendo un esfuerzo para conseguir una producción de cemento más ecoeficiente, intentando utilizar, siempre que sea posible, materias primas y combustibles alternativos (procedentes de residuos) para la producción del clínker, en sustitución de los combustibles y materias primas convencionales. Si bien, la cantidad de combustibles alternativos varía considerablemente en los distintos países y en las distintas plantas, el inventario considerado para este estudio, procedente de 8 plantas suizas, supone un porcentaje de energía procedente de residuos para la cocción de clínker del 36,5%. El uso de residuos en hornos de clínker conlleva una clara mejora medioambiental respecto a su combustión en incineradoras, debido a la mayor temperatura del horno de clínker (850-2.200°C frente a 850-1.480 en incineradoras) y al mayor tiempo de residencia de los gases de combustión (2-6 s frente a 0-3 s en incineradoras). Todo ello produce una destrucción de los compuestos orgánicos de los residuos, evitando la emisión de dioxinas y furanos. No obstante, existen algunas limitaciones sobre los residuos utilizables en hornos de clínker. Por

ejemplo, el contenido de metales volátiles (como mercurio o talio) en los residuos debe ser muy bajo, ya que no son retenidos al 100%. Asimismo debe limitarse el uso de residuos con cantidades apreciables de cloro, ya que su porcentaje en el cemento está limitado al 0,1% en peso.

El componente principal del cemento es el clínker, constituido en sus dos terceras partes por silicatos de calcio cristalizado, ricos en óxido de calcio y que reaccionan rápido con el agua (Kündig, et al., 1997).

La fabricación de cemento se divide en tres etapas principales (Romay M., 2004):

- “Obtención, preparación y molienda de las materias primas (caliza, marga, arcilla, pizarra, etc.) que aportan los siguientes compuestos minerales: carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ), óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Se obtiene una mezcla pulverulenta de los minerales denominada crudo o harina.
- Cocción del crudo en hornos rotatorios hasta alcanzar una temperatura del material cercana a los  $1.450^\circ\text{C}$ , para ser enfriado bruscamente y obtener clínker.
- Molienda del clínker con otros componentes: yeso (regulador de fraguado) y adiciones (escorias de alto horno, cenizas volantes, caliza, puzolanas), para dar lugar a los distintos tipos de cemento.

En función de cómo se procesa el material antes de su entrada al horno de clínker existen 4 tipos de fabricación: vía seca, semiseca, semihúmeda y húmeda. En el proceso de vía seca (mayoritario en España y en Europa) la materia prima se introduce al horno en forma seca pulverulenta. El sistema del horno comprende una torre de ciclones para intercambio de calor en la que se precalienta el material en contacto con los gases provenientes del horno rotatorio. El proceso de descarbonatación de la caliza (calcinación) puede estar casi completado antes de la entrada del material en el horno si se instala una cámara de combustión (precalcinator) a la que se añade parte del combustible (puede suponer hasta el 60% del combustible total usado en el horno).

Los principales gases emitidos a la atmósfera por el horno son el nitrógeno proveniente del aire de combustión (45-75% en volumen), el dióxido de carbono (11-29% en volumen), proveniente de la descarbonatación de la caliza y de la combustión, vapor de agua (10-39% en volumen) proveniente de las materias primas y del proceso de combustión y oxígeno (4-12% en volumen).”

Los datos de inventario del clínker incluyen el proceso de fabricación completo (suministro de materias primas, molienda, mezcla, horno rotativo), así como los transportes internos. Los residuos utilizados como materias primas y combustibles secundarios no tienen ninguna carga ambiental asociada, exceptuando su transporte a la planta y las emisiones derivadas de su combustión. El 60% de las emisiones de  $\text{CO}_2$  en la fabricación de clínker se deben principalmente al proceso de descarbonatación ( $\text{CO}_3\text{Ca} \Rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ) que supone 0,54 kg  $\text{CO}_2$  por cada kilogramo de clínker producido. El 40% restante, que supone 0,35 kg  $\text{CO}_2/\text{kg}$  clínker, se emite durante la combustión, por oxidación del combustible (Sanjuán M.A., 2007).

Las materias primas consideradas en el inventario, tanto convencionales (que suponen el 93,6% en peso) como alternativas (que suponen el 6,4% en peso), para la producción de 1 kg de clínker se muestran en la siguiente tabla.

Materias Primas	Tipo	Cantidad (kg)	%
Bauxita	Convencional	0,0001	0,01
Cal hidratada		0,004	0,22
Piedra caliza		0,84	47,65
Margas calcáreas		0,47	26,40
Arena		0,009	0,52
Arcilla		0,33	18,75
SUBTOTAL Materias Primas Convencionales		1,65	93,56
Hidróxido de aluminio	Alternativo	0,0005	0,03
Productos de construcción voluminosos		0,0013	0,07
Cenizas de plantas papeleras		0,01	0,58
Lodos de descarbonatación		0,02	1,13
Arena de moldeo		0,002	0,11
Lodos de cal de la producción de piedra caliza		0,063	3,54
Tierra impregnada con petróleo		0,0064	0,36
Cenizas de piritas		0,005	0,26
Lodos		0,0031	0,17
Otros		0,0033	0,19
SUBTOTAL Materias Primas Alternativas		0,11	6,44
TOTAL		1,76	100

Tabla 3.40. Materias primas necesarias para la fabricación de 1 kg de clínker

La siguiente tabla presenta los combustibles convencionales y alternativos considerados en el inventario para la producción de 1 kg de clínker. En este caso, los combustibles alternativos suponen el 36,5% de la energía del total de combustibles utilizados. Para obtener la energía total requerida por la planta de producción de clínker habría que añadir a los combustibles utilizados un pequeño consumo eléctrico en la molienda y calcinación de 0,06 kWh/kg de clínker.

Combustibles	Tipo	Cantidad (MJ)	%
Gas natural	Convencional	0,007	0,20
Gasóleo		0,016	0,47
Fuel oil		1,03	30,76
Hulla		0,94	28,15
Coque de petróleo		0,13	3,88
SUBTOTAL Combustibles Convencionales		2,12	63,46
Lodos desecados	Alternativo	0,075	2,24
Aceite usado		0,58	17,45
Disolventes		0,16	4,90
Neumáticos usados		0,14	4,06
Residuos de destilación		0,023	0,67
Plásticos		0,099	2,96
Harina de goma		0,0026	0,08
Residuos de coque de filtros de coque		0,008	0,25
Harina de carne y huesos		0,05	1,39
Grasa animal		0,034	1,02
Otros combustibles sólidos	0,05	1,51	
SUBTOTAL Combustibles Alternativos		1,22	36,54
TOTAL		3,34	100

Tabla 3.41. Combustibles necesarios para la fabricación de 1 kg de clínker

El inventario considerado para el cemento es una mezcla de distintos tipos de cemento: 2% de cemento de escorias de alto horno, 50% de cemento Portland calcáreo, 40% de cemento Portland (CEM I 42,5), 6% de cemento Portland (CEM I 52,5), y 2% de cemento de arena y escorias. La siguiente tabla presenta las

principales materias primas necesarias para la fabricación de los distintos tipos de cemento considerados en los inventarios.

Tipo de cemento	Clínker (kg)	Yeso: CaSO <sub>4</sub> + 2 H <sub>2</sub> O (kg)	Piedra caliza: CaCO <sub>3</sub> (kg)	Escoria seca granulada de alto horno (kg)
Cemento Portland (CEM I 42,5*)	0,903	0,052	0,045	-
Cemento Portland (CEM I 52,5*)	0,912	0,063	0,025	-
Cemento Portland calcáreo (CEM II/A-L 32,5*)	0,787	0,054	0,159	-
Cemento Portland de arena y escorias (CEM II/A-S 42,5*)	0,764	0,046	0,05	0,14
Cemento de escorias de alto horno (CEM III/B 32,5*)	0,459	0,04	0,04	0,46

Tabla 3.42. Tipos de cemento y materias primas necesarias por kilogramo de cemento.

Nota: \* indica la resistencia a compresión en N/mm<sup>2</sup> tras un tiempo de curado de 28 días.

Para la producción de cemento se requiere un pequeño consumo de electricidad en la molienda que varía entre 0,02 y 0,05 kWh/kg de cemento, en función de la finura del cemento requerido.

Sustancia	Unidad	Cantidad
Calcita, en terreno	kg	1,00
Arcilla genérica, en terreno	kg	0,38
Carbón, antracita, genérico, en terreno	kg	0,05
Petróleo, crudo, en terreno	kg	0,03
Energía (poder calorífico superior), en forma de biomasa	MJ	0,02
Grava, en terreno	kg	0,02
Gas natural, en terreno	m <sup>3</sup>	0,01

Tabla 3.43. Datos de inventario: principales materias primas para la fabricación de 1 kg de cemento (valor de corte=1%)

El mayor impacto en la fabricación de cemento se produce durante el proceso previo de fabricación del clínker. Dicho proceso supone el 75% de la energía incorporada al cemento debido principalmente al fueloil y hulla utilizados como combustible, el 91% del potencial de calentamiento global del cemento, el 68% de su huella hídrica y el 72% de la puntuación única. Aunque con un impacto mucho menor, también cabe destacar la disposición final del cemento en vertedero y los transportes- tanto de materias primas como de planta a obra-, que representan cada uno de ellos el 12% de la puntuación única. Las sustancias que más contribuyen a la energía incorporada son el petróleo (47%) y el carbón (25%), mientras que las sustancias de mayor impacto en puntuación única son el petróleo (31%), así como las emisiones de CO<sub>2</sub> (21%) y de NO<sub>x</sub> (19%).

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida				Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Construcción	Disposición Final (vertedero)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	3,60	0,33	0,001	0,31	4,24
	85,0%	7,7%	0,0%	7,3%	
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	0,79	0,02	0,000	0,01	0,82
	95,9%	2,4%	0,0%	1,7%	

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida				Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Construcción	Disposición Final (vertedero)	
Huella hídrica (l)	3,26	0,15	0,28	0,25	3,94
	82,8%	3,7%	7,2%	6,2%	
Puntuación única (mPt)	16,47	1,76	0,01	2,51	20,75
	79,4%	8,5%	0,0%	12,1%	

Tabla 3.44. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de cemento

### 3.2.3.2. Mortero de cemento

El mortero de cemento puede distinguirse del hormigón por el tamaño máximo de los elementos que lo componen. Generalmente, el mortero sólo contiene arena con un tamaño máximo de grano de 2 a 4 mm (Locher F.W., Kropp J., 1997). Además de cemento, otros materiales como la cal hidráulica pueden utilizarse como conglomerante.

El mortero puede utilizarse tanto en interiores como al aire libre, para enlucido y/o reparación de muros y tabiques, unión de elementos prefabricados de hormigón, etc.

Los morteros de cemento se pueden clasificar en función de la proporción de mezcla de cemento y arena. El mortero de cemento analizado en este apartado pertenece al denominado grupo III, lo que significa que la proporción de sus ingredientes es una parte en volumen de cemento y cuatro partes en volumen de arena con su nivel de humedad natural (Wendehorst R., Vollenschaar D., 1998). Las principales especificaciones técnicas (Starzner S., Würmer-Weiss P., 2000) del mortero analizado son: resistencia a la compresión mayor de 10 N/mm<sup>2</sup>, densidad aparente de 1.500-2.000 kg/m<sup>3</sup>, y conductividad térmica de 1,4 W/mK.

Las materias primas necesarias para la fabricación de 1 kg de mortero son: 0,8 kg de arena de sílice y 0,2 kg de cemento Portland. Para poder usar el mortero, se requerirá añadir una cantidad de agua de 0,08-0,15 l/kg (Kasser U., Pöll M., 1998). En este estudio se supone que esta operación se hace in-situ en el propio edificio donde se aplica el mortero, por lo que se incluye en la etapa de construcción.

El consumo energético para la fabricación de 1 kg de mortero se estima en 0,0278 kWh de electricidad, para la mezcla de los ingredientes del mortero (Kasser U., Pöll M., 1998). Respecto al transporte de las materias primas a la planta de mortero, se supone que la arena es transportada 5 km mediante camiones de 28t (asumiendo que la planta se sitúa en las proximidades de una cantera), mientras que el cemento es transportado una distancia de 100 km, la mitad por ferrocarril y la otra mitad por camión.

Sustancia	Unidad	Cantidad
Grava, en terreno	kg	0,88
Calcita, en terreno	kg	0,22
Energía (poder calorífico superior), en forma de biomasa	MJ	0,13
Arcilla genérica, en terreno	kg	0,08
Carbón, antracita, genérico, en terreno	kg	0,02
Petróleo, crudo, en terreno	kg	0,01
Dióxido de carbono, en el aire	kg	0,01

Tabla 3.45. Datos de inventario: principales materias primas para la fabricación de 1 kg de mortero de cemento (valor de corte=1%)

Los procesos que más contribuyen a la energía incorporada son la producción de clínker (32%) y los transportes (22%) -tanto de materias primas como de planta a obra- siendo el petróleo la sustancia que supone el 53% de la energía incorporada. En cuanto al potencial de calentamiento global, la producción de clínker supone el 69% del impacto, seguido por los transportes con un 12%. El proceso con una mayor huella hídrica es la producción de arena de sílice (37%), seguida de la producción de clínker (18%). Finalmente, en lo que respecta a la puntuación única, destaca nuevamente la producción de clínker (31%), los transportes (25%) y la disposición final del mortero en vertedero (24%), siendo las sustancias de mayor impacto: el petróleo (35%) y las emisiones de NO<sub>x</sub> (17%) y de CO<sub>2</sub> (12%).

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida				Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Construcción	Disposición Final (vertedero)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	1,54	0,33	0,001	0,31	2,17
	70,7%	15,0%	0,1%	14,2%	
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	0,21	0,02	0,000	0,01	0,24
	86,2%	8,0%	0,0%	5,8%	
Huella hídrica (l)	2,65	0,15	0,28	0,25	3,33
	79,7%	4,4%	8,5%	7,4%	
Puntuación única (mPt)	6,08	1,76	0,01	2,51	10,36
	58,7%	17,0%	0,0%	24,3%	

Tabla 3.46. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de mortero de cemento

### 3.2.3.3. Hormigón en masa (no armado)

El hormigón no armado, también denominado hormigón en masa, es una mezcla de cemento con áridos -grava o arena- y agua. El hormigón, es un material de alta duración que ofrece una buena resistencia a la compresión, pero no a la tracción ni a otro tipo de esfuerzos. Su conductividad térmica de 1,5-3,7 W/mK, aumentando proporcionalmente a su densidad. Según la Asociación Nacional Española de Hormigón Preparado en España se produjeron casi 69 millones de m<sup>3</sup> de hormigón, aún con un descenso del 28% respecto al año anterior.

Para garantizar la calidad del hormigón producido es preciso disponer de unas instalaciones de almacenamiento adecuadas, en las que el cemento y la arena estén protegidos de la humedad y los agregados finos y gruesos estén almacenados separadamente. En las plantas de fabricación de hormigón, las materias primas son transportadas mediante cintas transportadoras en las cantidades precisas a la estación de mezcla. Un sistema automático detecta la humedad superficial de los agregados, ajustando la cantidad de agua añadida a la mezcla. Los aditivos sólidos se añaden a la mezcla con el cemento, mientras que los aditivos líquidos se mezclan con el agua. Los superplastificantes para mejorar la resistencia se añaden al hormigón fresco en una segunda mezcla, inmediatamente antes de colocar el hormigón, ya que sólo son efectivos por un período limitado de tiempo. Para conseguir un hormigón fresco bien mezclado y homogéneo, los componentes se introducen en mezcladores formados por tambores rotativos equipados con cuchillas y bandejas fijas o giratorias, en las que las cuchillas giran sobre ejes verticales o tambores horizontales en los que las cuchillas en espiral rotan sobre un eje horizontal. El tiempo de mezclado necesario depende de la cantidad y tipo de la mezcla, situándose entre 30 y 120 segundos, por lo que un camión-hormigonera puede requerir de hasta 100 vueltas de la cuba para garantizar una correcta mezcla.

Los datos de inventario utilizados en este estudio proceden de 6 plantas suizas de producción de hormigón e incluyen el proceso completo de fabricación, los transportes y la infraestructura. El hormigón considerado es de tipo B25/35 (densidad de 2.000-2.800 kg/m<sup>3</sup> con resistencia a la compresión mínima de 25 y media de 35 N/mm<sup>2</sup>). Las materias primas utilizadas para fabricar 1 m<sup>3</sup> de hormigón son: 1.891 kg de grava redondeada, 300 kg de cemento Portland (CEM I 42,5) y 186 kg de agua; obteniendo un hormigón con una densidad de 2380 kg/m<sup>3</sup>. Se supone que, por cada m<sup>3</sup> de hormigón, se producen 0,0143 m<sup>3</sup> de aguas residuales (Künniger T., et al., 2001), que son conducidas al sistema de alcantarillado. Los consumos energéticos son de 4,36 kWh/m<sup>3</sup> de hormigón (electricidad) y de 4,383 MJ/m<sup>3</sup> de hormigón (gas, gasóleo y fueloil).

Sustancia	Unidad	Cantidad
Grava, en terreno	kg	0,83
Calcita, en terreno	kg	0,14
Arcilla genérica, en terreno	kg	0,05

Tabla 3.47. Datos de inventario: principales materias primas para la fabricación de 1 kg de hormigón no armado (valor de corte=1%)

Los procesos que más contribuyen a la energía incorporada son la producción de clínker (39%), la disposición final del hormigón en vertedero (28%) y los transportes (17%) -tanto de materias primas como de planta a obra. En cuanto al potencial de calentamiento global, la producción de clínker supone el 76% del impacto, seguido de la disposición final en vertedero con un 10%. El proceso con una mayor huella hídrica es la obtención de grava redondeada (63%), seguida de la producción de clínker (18%). Por último, en lo que respecta a la puntuación única, destacan la disposición final en vertedero (41%), la producción de clínker (34%) y los transportes (14%). El petróleo es la sustancia que más contribuye a la energía incorporada y a la puntuación única con un 61% y 35% respectivamente.

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida			Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Disposición Final (vertedero)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	0,62	0,18	0,31	1,11
	55,8%	16,3%	27,9%	
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	0,11	0,01	0,01	0,14
	82,3%	7,6%	10,2%	
Huella hídrica (l)	1,71	0,09	0,25	2,05
	83,5%	4,4%	12,0%	
Puntuación única (mPt)	2,77	0,79	2,51	6,08
	45,6%	13,0%	41,4%	

Tabla 3.48. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de hormigón no armado

### 3.2.3.4. Hormigón armado

El hormigón armado se empezó a usar a finales del siglo XIX, por lo que se trata de un material relativamente reciente, si bien, en la actualidad es uno de los materiales más utilizados en la construcción. El hormigón armado consta básicamente de hormigón en masa, al que se añade un refuerzo a base de barras o mallas de acero corrugado, denominadas armaduras, que mejoran notablemente la reducida resistencia a la tracción del hormigón en masa. En ocasiones a estas barras se les

añaden fibras plásticas, dependiendo de las especificaciones que deba cumplir el producto final.

Para este estudio, se creó un inventario específico a partir del inventario ya existente del hormigón (analizado en el apartado 3.2.3.3) y del inventario del acero (que se analizará en el apartado 3.2.5.1). Si bien las proporciones hormigón/acero pueden variar en función de la aplicación condicionando los impactos obtenidos (Goggins J., Keane T., Kelly A., 2010), para este estudio se ha supuesto que dicho producto está constituido por un 97% en peso de hormigón y un 3% en peso de acero (Mauch S., et al., 1995).

Sustancia	Unidad	Cantidad
Grava, en terreno	kg	0,81
Calcita, en terreno	kg	0,14
Arcilla genérica, en terreno	kg	0,05
Carbón, antracita, genérico, en terreno	kg	0,03
Hierro, 46% en mineral, 25% en mineral crudo, en terreno	kg	0,02

Tabla 3.49. Datos de inventario: principales materias primas para la fabricación de 1 kg de hormigón armado (valor de corte=1%)

Los procesos que más contribuyen a la energía incorporada son la producción de acero (38%), de clínker (24%) y la disposición final del hormigón armado en vertedero (18%). En cuanto al potencial de calentamiento global, la producción de clínker supone el 57% del impacto, seguido de la producción de acero con un 24%. El proceso con una mayor huella hídrica es la obtención de grava redondeada (46%), seguida de la producción de acero (28%) y de clínker (13%). Por último, en lo que respecta a la puntuación única, destacan la producción de acero (34%), la disposición final en vertedero (29%) y la producción de clínker (21%). El petróleo es la sustancia que más contribuye a la energía incorporada y a la puntuación única con un 69% y 40% respectivamente.

En la tabla siguiente se presentan los impactos del ciclo de vida del hormigón armado y se muestra el aumento del impacto producido con respecto al hormigón en masa.

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida			Impacto Total	Aumento del impacto (%)
	Fabricación	Transporte a la obra	Disposición Final (vertedero)		
Energía incorporada total (MJ-Eq)	1,29	0,19	0,33	1,80	+63
	71,3%	10,2%	18,4%		
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	0,15	0,01	0,02	0,18	+31
	85,3%	5,9%	8,7%		
Huella hídrica (l)	2,42	0,09	0,25	2,77	+35
	87,5%	3,3%	9,1%		
Puntuación única (mPt)	5,85	0,82	2,69	9,36	+54
	62,5%	8,8%	28,7%		

Tabla 3.50. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de hormigón armado

### 3.2.3.5. Medidas de ecoeficiencia propuestas para cemento y hormigón

La industria cementera requiere un gran consumo de energía, que representa el 30-40% de los costes de producción. La fabricación del clínker, conlleva actualmente



en España un alto consumo de coque de petróleo, que condiciona el impacto de los distintos productos elaborados en base a cemento. Por este motivo, la fracción renovable del indicador de energía primaria incorporada en los distintos productos analizados es baja (3-9%).

La mejor tecnología disponible para la fabricación de clínker es un horno rotatorio de vía seca, dotado de precalentador de ciclones multietapas y precalcinador, cuyo consumo energético es de 2.900-3.200 MJ por tonelada de clínker (la mitad del consumo de los hornos de vía húmeda). Hay que destacar que el aporte energético teórico para la cocción de las materias primas es de 1.700-1.800 MJ/t de clínker, por lo que todavía existe un potencial de mejora tecnológica. Se estima que sería técnicamente posible reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> del cemento en 2050 por un factor de dos respecto a los niveles de 1990 (Habert G., et al., 2010).

Según el IDAE, la industria del cemento en España ha experimentado una reducción del 13,5% del consumo unitario asociado a su producción en el periodo 1990-2007, debido a la incorporación de mejoras tecnológicas en su proceso productivo. Sin embargo, el potencial de mejora existente es mucho mayor.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se proponen las siguientes medidas de mejora:

#### **Valorización energética de residuos como combustibles y materias primas para la fabricación del clínker:**

La mejora de los impactos medioambientales del cemento y sus productos pasa por una fabricación más ecoeficiente del clínker. En España, el uso de residuos (cenizas volantes y escorias de alto horno principalmente) como combustibles alternativos en la fabricación del clínker, si bien muestra una tendencia ascendente, supone tan sólo el 4,2% en energía respecto al consumo total de combustibles, mientras que el uso de residuos (harinas cárnicas, neumáticos usados y disolventes principalmente) como materias primas alternativas representa el 11% del consumo total de materias primas en cementeras (Instituto Cerdá, 2009). No obstante, las cifras anteriores varían mucho entre las distintas plantas y las distintas Comunidades Autónomas. De hecho, en regiones como Murcia, donde el porcentaje de sustitución energética de combustibles convencionales por alternativos se acerca al 30%, el inventario suizo constituye una buena aproximación. Otro aspecto a destacar es que el mix de combustibles convencionales en España difiere bastante del suizo, ya que, en el caso español, por término medio, el 90% en peso de estos combustibles proviene del coque de petróleo (Instituto Cerdá, 2009). Conviene recordar que en el inventario suizo, los combustibles alternativos suponen el 36,5% de la energía del total de combustibles y las materias primas alternativas, el 6,44% en peso del total de materias primas.

El escenario de producción ecoeficiente propuesto supone una fabricación del clínker con un 80% de sustitución energética de los combustibles fósiles por combustibles alternativos, manteniendo el mismo porcentaje en peso de uso de materias primas alternativas. Este escenario se aproxima bastante a la realidad del sector cementero holandés (Alonso y Asociados, 2008). En la Tabla 3.51 y la Tabla 3.52 se comparan los impactos según el inventario suizo de *Ecoinvent*, con los impactos que se producen al adaptar dicho inventario a las características actuales del sector cementero español, y los que habría en un escenario de producción más ecoeficiente.

Categoría de impacto	España		Suiza (Ecoinvent)	Escenario Ecoeficiencia	
	Impacto Fabricación Clínter	Aumento Impacto Fabricación Clínter (%)	Impacto Fabricación Clínter	Impacto Fabricación Clínter	Disminución Impacto Fabricación Clínter (%)
Energía incorporada total (MJ-Eq)	6,80	79,3%	3,79	1,82	52,1%
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	0,97 (0,96)	5,4% (18,6%)	0,92 (0,81)	0,87 (0,64)	5,2% (20,6%)
Huella hídrica (l)	4,07	26,8%	3,21	2,85	11,4%
Puntuación única (mPt)	31,71 (31,64)	77,1% (82,6%)	17,90 (17,33)	13,09 (11,84)	26,9% (31,7%)

Tabla 3.51. Evaluación del impacto de la etapa de fabricación del clínter (1 kg) según distintos escenarios de valorización energética de los residuos

Las cifras que figuran entre paréntesis en la Tabla 3.51 indican el potencial de calentamiento global y puntuación única en caso de no asignar emisiones de CO<sub>2</sub> a los combustibles alternativos, lo que tendría sentido en caso de utilizar residuos biomásicos.

Categoría de impacto	Cemento			Mortero de cemento		
	España	Suiza (Ecoinvent)	Escenario Ecoeficiencia	España	Suiza (Ecoinvent)	Escenario Ecoeficiencia
Energía incorporada total (MJ-Eq)	6,74 (+59,2%)	4,24	2,42 (-42,9%)	2,71 (+25%)	2,171	1,8 (-17,1%)
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	0,87 (+6%)	0,82	0,78 (-4,3%)	0,25 (+4,4%)	0,241	0,23 (-3,2%)
Huella hídrica (l)	4,66 (+18,2%)	3,94	3,63 (-7,8%)	3,48 (+4,7%)	3,329	3,26 (-2%)
Puntuación única (mPt)	32,26 (+55,5%)	20,75	16,74 (-19,3%)	12,85 (+24,1%)	10,358	9,49 (-8,4%)

Categoría de impacto	Hormigón en masa			Hormigón armado		
	España	Suiza (Ecoinvent)	Escenario Ecoeficiencia	España	Suiza (Ecoinvent)	Escenario Ecoeficiencia
Energía incorporada total (MJ-Eq)	1,45 (+31,1%)	1,11	0,88 (-20,2%)	2,14 (+18,5%)	1,8	1,59 (-12%)
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	0,15 (+5,9%)	0,14	0,13 (-2,5%)	0,19 (+4,4%)	0,18	0,18 (-1,9%)
Huella hídrica (l)	2,17 (+6%)	2,05	2,03 (-0,8%)	2,89 (+4,3%)	2,77	2,75 (-0,6%)
Puntuación única (mPt)	7,73 (+27,2%)	6,08	5,61 (-7,7%)	10,96 (+17,2%)	9,36	8,9 (-4,8%)

Tabla 3.52. Evaluación del impacto total del ciclo de vida en los distintos productos analizados (1kg) según distintos escenarios de valorización energética de los residuos

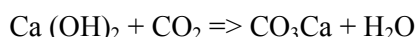
El uso de residuos como combustible requiere una inversión en instalaciones de gestión (recepción, manipulación y almacenamiento) del combustible que se estima entre 1 y 5 M€, en función del tipo de residuo a tratar, mayor para los residuos

sólidos más voluminosos y/o peligrosos, y menor para los residuos líquidos no peligrosos.

### **Utilización de morteros de cal en detrimento de los morteros de cemento:**

Los morteros de cal son uno de los materiales más utilizados en la bioconstrucción. En comparación con los morteros de cemento, poseen una velocidad de fraguado más lenta, ofreciendo más elasticidad y permeabilidad al vapor de agua, lo que permite una mejor transpiración de los edificios.

El hidróxido cálcico fragua lentamente absorbiendo CO<sub>2</sub> del aire, en un proceso de recarbonatación que puede durar varios meses.



En este proceso, el CO<sub>2</sub> absorbido se estima en 0,5 kg CO<sub>2</sub>/kg de cal, lo que compensa sustancialmente las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a los procesos de decarbonatación y combustión, que son de 0,8 kg CO<sub>2</sub>/kg de cal, produciendo una disminución de las emisiones del 62%, circunstancia que se produce de forma mucho más limitada tanto en los morteros de cemento como en el hormigón.

En el hormigón, la profundidad de recarbonatación tras 40 años forma una mínima capa blanca de tan sólo de 5 - 10 mm, siendo proporcional a la superficie en contacto con el aire y a la raíz cuadrada del tiempo de exposición del hormigón al aire. Un estudio publicado por el Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción (Galán I., 2009) concluye que, de manera aproximada, se puede estimar que la absorción de CO<sub>2</sub> durante la vida útil de los elementos de hormigón varía entre el 1,3 y el 2,1% de las cantidades de CO<sub>2</sub> emitidas en la fabricación del cemento necesario para su construcción. Dicho estudio no cuantifica sin embargo la cantidad de CO<sub>2</sub> que el hormigón secuestra de la atmósfera tras su demolición y posterior almacenamiento en escombreras al aire libre. En ese caso, los porcentajes anteriores se podrían llegar a duplicar, al aumentar la superficie expuesta al aire. A pesar de ello, la absorción sería pequeña (entre 0,006 y 0,014 kg CO<sub>2</sub>/kg de hormigón considerando 2 años en escombrera), siendo en cualquier caso más interesante la opción del reciclado, planteando siempre el almacenamiento de los áridos reciclados al aire libre para aprovecharse de este efecto.

### **Reciclado o reutilización del hormigón:**

El hormigón es un material 100% reciclable. El proceso para llevar a cabo su reciclado consiste en la demolición de la estructura, el machaqueo de los bloques de hormigón resultantes y la separación de la armadura (acero) que esté mezclada con el hormigón. Generalmente las plantas de reciclaje de RCDs se localizan en áreas urbanas cerca del emplazamiento de la construcción, mientras que los áridos naturales lo hacen a mayores distancias, por lo que el reciclaje suele producir una disminución en las necesidades totales de transporte.

Entre las posibilidades de utilización del hormigón reciclado cabe citar: como árido grueso para la fabricación de subbases en carreteras ofreciendo incluso una mejor compactación y resistencia que los áridos naturales; como árido para la fabricación de nuevos hormigones, cuando se encuentra bien seleccionado y limpio; como árido fino en sustitución de la arena natural, pero reduciendo su grado de absorción que suele ser mayor al de los áridos naturales; y como árido grueso para la fabricación de hormigón estructural, vigilando nuevamente su grado de absorción y

añadiendo algo más de cemento para compensar la reducción que se puede producir en la resistencia del producto. Hay que reseñar que la Instrucción Española de Hormigón Estructural limita el uso de árido grueso reciclado para la fabricación de nuevo hormigón estructural a tan solo un 5%.

Categoría de impacto	Hormigón en masa	Hormigón armado
Energía incorporada total (MJ-Eq)	0,858 (-22,4%)	1,554 (-13,7%)
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	0,127 (-7,3%)	0,169 (-5,6%)
Huella hídrica (l)	1,816 (-11,2%)	2,539 (-8,3%)
Puntuación única (mPt)	4,926 (-18,9%)	8,205 (-12,3%)

Tabla 3.53. Evaluación del impacto total del ciclo de vida del hormigón (1 kg) suponiendo su reciclado total

### **Implantación de la tecnología de lecho fluido en las plantas de fabricación de clínker:**

Se trata de una tecnología emergente, implantada con éxito en un par de plantas piloto en Japón. Los resultados obtenidos muestran reducciones en el consumo energético y emisiones del horno de hasta el 20% con respecto al valor correspondiente a la mejor tecnología disponible actualmente, obteniendo un clínker de similar o mejor calidad, y una reducción en los niveles de NOx del 50%. Además se estima que la implantación de esta tecnología conllevará una reducción del 30% del coste de las instalaciones y de las necesidades de espacio en planta.

### **Disminución de la temperatura de clinkerización:**

La temperatura de clinkerización puede reducirse si el “crudo” que entra al horno de clínker es más fino y homogéneo y se añaden sustancias fundentes y mineralizantes que aceleren las reacciones. Con todo ello, se podría obtener un ahorro de combustible en el horno del 2-3%, con un mínimo incremento del consumo eléctrico en la molienda de las materias primas.

### **Aprovechamiento del calor residual del horno de clínker:**

La energía térmica de los humos puede utilizarse para precalentar la carga, el combustible o el aire de combustión. Además, en caso de que los caudales de humos sean elevados se puede plantear la instalación de un ciclo orgánico de Rankine para producción de electricidad a partir de la vaporización y posterior turbinado de un aceite orgánico. Aproximadamente el 10-20% de la energía recuperada de los humos se puede convertir en electricidad. La inversión asociada es de 800-1200 € por kilovatio eléctrico instalado, amortizable generalmente a medio –largo plazo.

En la Figura 3.8 se presenta la caracterización aproximada del sector del cemento en España a través de su curva de Ahorro-Inversión, obtenida a partir de la evaluación de las anteriores medidas.

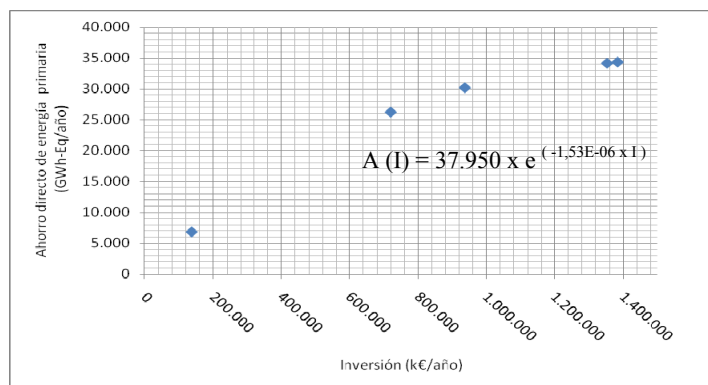
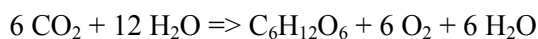


Figura 3.8. Curva Ahorro-Inversión del sector del cemento en España

La reutilización del hormigón y la valorización energética de residuos proporcionarían altos niveles de ahorro con inversiones relativamente bajas, en contraste con medidas como la implantación de la tecnología de lecho fluido, cuya ratio ahorro/inversión sería mucho más baja. Se estima que el ahorro máximo potencial podría llegar al 50% de la demanda de energía primaria total del sector.

### 3.2.4. Maderas

La madera de los árboles se produce a partir de dióxido de carbono, agua y diversos nutrientes, y radiación solar. De forma simplificada, el proceso de fotosíntesis se puede describir a partir de la siguiente reacción, donde la molécula de glucosa ( $C_6H_{12}O_6$ ) representa la biomasa de los árboles:



La energía almacenada teóricamente en forma de glucosa es de 2.872 kJ/mol, que supone aproximadamente 16 MJ/kg de madera completamente seca (Werner F., et al., 2007).

Según su dureza, la madera puede ser blanda, si procede de árboles de hoja perenne (como las coníferas –pino, abeto, etc.-) o dura (como el fresno, castaño, haya, etc.), si procede de árboles de hoja caduca de crecimiento lento. Las maderas blandas son más baratas y debido a su menor densidad, resultan más fáciles de transportar y manipular, aunque se astillan más, y, generalmente presentan una durabilidad -especialmente a la intemperie- menor que las maderas duras. A la hora de analizar la madera dura y blanda, en este estudio se han considerado las maderas de haya y de abeto respectivamente, debido a la mayor disponibilidad de inventarios.

La madera, como cualquier material biogénico, está sujeto a la degradación biológica y fotoquímica, por lo que su uso como material constructivo requiere su protección, que se lleva a cabo normalmente mediante aditivos.

#### 3.2.4.1. Madera aserrada

Para producir madera blanda aserrada, el árbol es inicialmente cortado con una motosierra, y conducido mediante un tractor a la pista forestal. Se estima que por cada  $m^3$  de madera en pista forestal con una humedad del 70% se consumen 28,4 MJ de gasóleo y se generan  $0,1 m^3$  de astillas de corteza que permanecen en el bosque.

Seguidamente se transporta mediante camión al aserradero una distancia promedio de 40 km. Para producir 1 m<sup>3</sup> de madera blanda aserrada se requieren 1,71 m<sup>3</sup> de madera blanda de pista forestal y un consumo eléctrico de 32,7 kWh para los procesos de aserrado, generando 0,71 m<sup>3</sup> de madera residual. En este proceso, la madera mantiene su nivel de humedad (70%).

Para reducirlo hasta un nivel del 20%, el siguiente paso es el secado de la madera, que suele hacerse en un horno térmico localizado normalmente en el propio aserradero. Para producir 1 m<sup>3</sup> de madera blanda aserrada secada en horno se necesitan 1,1 m<sup>3</sup> de madera blanda aserrada, 638 MJ de virutas de madera para alimentar el horno y un consumo eléctrico de 16,7 kWh, generándose en el proceso un calor residual de 59,9 MJ.

Por último se procede al cepillado de la madera con objeto de suavizar sus caras y contorno, a la vez que conseguir una dimensión determinada de la pieza. Se requieren 1,15 m<sup>3</sup> de madera blanda aserrada secada y un consumo eléctrico de 31,1 kWh para producir 1 m<sup>3</sup> de madera cepillada, generando en el proceso 0,15 m<sup>3</sup> de madera residual.

Sustancia	Unidad	Cantidad
Energía (poder calorífico superior), en forma de biomasa	MJ	17,38
Dióxido de carbono, en el aire	kg	1,55
Grava, en terreno	kg	0,34
Carbón, antracita, genérico, en terreno	kg	0,03
Petróleo, crudo, en terreno	kg	0,02
Gas natural, en terreno	m <sup>3</sup>	0,02

Tabla 3.54. Datos de inventario: principales materias primas para la fabricación de 1 kg de madera blanda aserrada secada en horno y cepillada (valor de corte=1%)

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida			Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Disposición Final (incineración)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	20,47	0,33	0,20	21,00
	97,5%	1,6%	0,9%	
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	-1,19	0,02	1,47	0,30
	-44,4%	0,7%	54,9%	
Huella hídrica (l)	3,80	0,15	1,17	5,12
	74,2%	2,9%	22,9%	
Puntuación única (mPt)	49,86	1,76	10,83	62,45
	79,8%	2,8%	17,3%	

Tabla 3.55. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de madera blanda aserrada secada en horno y cepillada

### 3.2.4.2. Madera laminada

Las vigas de madera laminada se empezaron a utilizar en la construcción hacia el año 1930, gracias al desarrollo de las resinas adhesivas sintéticas. Actualmente la madera laminada se utiliza cada vez más como elemento estructural en los edificios.

En la madera laminada se utilizan láminas serradas de 20-45 mm de abeto (a veces, pino o alerce), por su fácil procesado, ofreciendo a la vez, un nivel suficiente de resistencia y durabilidad. que ofrece. Las maderas duras sólo se usan para la

fabricación de componentes que deban soportar cargas muy pesadas. El pegado de las láminas se hace aplicando colas a base de resinas de urea, salvo para componentes exteriores sometidos a importantes variaciones meteorológicas, en los que se suelen aplicar adhesivos altamente resistentes a la intemperie a base de resinas Fenol-Resorcinol- Formaldehído (PRF).

Las láminas aserradas son inicialmente pre-secadas y clasificadas. El control de la humedad y temperatura es un punto crítico para garantizar la calidad del producto final. Las variaciones en el contenido de humedad de las diferentes juntas no debe ser superior al 2%. Tras aplicar las cola, los tableros encolados se prensan y se almacenan durante unas horas a una temperatura de 40°C para asegurar el curado de la resina adhesiva.

Según el inventario utilizado en este estudio, las materias primas necesarias para fabricar 1 m<sup>3</sup> de madera laminada son: 1,37 m<sup>3</sup> de madera aserrada de abeto (previamente secada al aire y con un contenido de humedad del 20%) y 12 kg de resina de urea-formaldehído (si la madera es para uso interior) o bien la misma cantidad de resina de melamina-formaldehído (si la madera es para uso exterior). El transporte se estima en 700 km para las resinas (600 km en ferrocarril y 100 km en camión) y 150 km para la madera (100 km en ferrocarril y 50 km en camión). Además de las emisiones de los combustibles utilizados en los equipos térmicos, se supone que el 0,1% en masa de la resina utilizada pasa al aire (0,012 kg). En cuanto al consumo energético, por cada m<sup>3</sup> de madera laminada se requieren principalmente: 2.682 MJ procedentes de virutas de madera residuales y 23 MJ de gasóleo para cubrir la demanda térmica de la planta y 129 kWh para cubrir los consumos eléctricos en planta.

Sustancia	Unidad	Cantidad (uso exterior)	Cantidad (uso interior)
Energía (poder calorífico superior), en forma de biomasa	MJ	20,25	20,29
Dióxido de carbono, en el aire	kg	1,80	1,80
Grava, en terreno	kg	0,44	0,43
Gas natural, en terreno	m <sup>3</sup>	0,06	0,05
Carbón, antracita, genérico, en terreno	kg	0,06	0,05
Petróleo, crudo, en terreno	kg	0,04	0,04
Carbón, lignito, en terreno	kg	0,02	0,02

Tabla 3.56. Datos de inventario: principales materias primas para la fabricación de 1 kg de madera laminada (valor de corte=1%)

La energía incorporada en este producto es principalmente de origen biomásico, debido a la madera utilizada como materia prima. No obstante se podrían destacar los consumos eléctricos y la fabricación de las resinas utilizadas que contribuirían a dicha energía incorporada con un 11% y 7% respectivamente. En cuanto al potencial de calentamiento global es obvio que la incineración al final de la vida útil es el proceso que más contribuye. En este caso las emisiones asociadas a la electricidad y la fabricación de resinas son de 0,153 kg CO<sub>2</sub>-Eq y 0,095 kg CO<sub>2</sub>-Eq respectivamente. Respecto a la huella hídrica, el 52% se debe al agua evaporada en las plantas termoeléctricas de carbón para satisfacer los consumos eléctricos del producto y el 15% a la producción de las resinas. Por último, destacar que aproximadamente la mitad de la puntuación única se debe a la ocupación forestal, el 14% a la incineración y el 9% a la fabricación de resinas. En la Tabla 3.57 se indican entre paréntesis los impactos en caso de madera laminada de uso interior, que como se puede observar son ligeramente inferiores.

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida			Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Disposición Final (incineración)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	27,28 (26,69)	0,33	0,29	27,89 (27,31)
	97,8%	1,2%	1,0%	
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	-0,99 (-1,03)	0,02	1,55	0,57 (0,54)
	-38,8%	0,8%	60,5%	
Huella hídrica (l)	7,61 (6,82)	0,15	1,40	9,16 (8,37)
	83,1%	1,6%	15,3%	
Puntuación única (mPt)	77,05 (74,30)	1,76	12,46	91,27 (88,51)
	84,4%	1,9%	13,6%	

Tabla 3.57. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de madera laminada para uso exterior

### 3.2.4.3. Tablero de madera aglomerado

A pesar de que la idea de hacer tableros a partir de partículas pegadas de residuos de madera data de principios del siglo XX, su producción no se generalizó hasta que el desarrollo de la industria química permitió disponer de los adhesivos adecuados.

Para la fabricación de tableros de partículas se utiliza madera de poco valor y residuos industriales de madera, como por ejemplo, astillas y virutas de cepillado y aserrado. Aunque todos los tipos de madera son adecuados para hacer tableros de partículas, en Europa y América del Norte (que representan el 75% de la producción mundial de tableros de partículas) se utiliza mayoritariamente madera procedente de conífera combinada con otros tipos de madera blanda y dura.

La madera utilizada en el proceso debe tener un nivel de humedad del 50% y estar libre de metales o sustancias minerales. Un nivel más bajo de humedad mejora la eficiencia de las astilladoras, pero incrementa la emisión de polvo y el peligro de incendio. Inicialmente las astilladoras reducen el tamaño de las partículas de madera. Para procesar dichas partículas y evitar su posible ruptura en el posterior prensado, sus niveles de humedad residual deben ser del 1-3%. Las partículas secas pasan a un mezclador donde se añade la cantidad necesaria de adhesivo adecuadamente dosificada. En el mezclador, el adhesivo roza contra la superficie de las partículas o bien es pulverizado en forma de spray. Debido al calor producido en la fricción, el mezclador debe ser enfriado con agua. Para repeler el agua y retrasar la dilatación se suele añadir una pequeña cantidad de parafina con el adhesivo.

Del flujo de partículas pegadas obtenido se separan mecánicamente las partículas gruesas, que se usan para el centro del tablero, de las finas, que se usan para la superficie. Posteriormente las partículas se pre-comprimen en una primera prensa en frío para pasar después a un prensado en caliente capaz de activar el adhesivo. En el prensado en caliente, a temperaturas de 200-230°C, el tablero se comprime hasta alcanzar el espesor final deseado y el adhesivo es curado de forma irreversible. Para finalizar los tableros se enfrían en el área de almacenamiento durante varios días y las juntas se liján.



Según el inventario utilizado en este estudio, las materias primas necesarias para fabricar 1 m<sup>3</sup> de tablero de partículas son: 0,128 m<sup>3</sup> de madera de haya con un 80% de humedad, 0,215 m<sup>3</sup> de madera de abeto con un 140% de humedad, 0,217 m<sup>3</sup> de madera residual dura con un 40% de humedad y 0,823 m<sup>3</sup> de madera residual blanda con un 40% de humedad. A ello hay que añadir los siguientes productos químicos: 51 kg de resina de urea-formaldehído, 11 kg de parafina, 1,36 kg de ácido clorhídrico y 0,64 kg de cloruro de amonio. El transporte se estima en 700 km para los productos químicos (600 km en ferrocarril y 100 km en camión) y 150 km para la madera (100 km en ferrocarril y 50 km en camión). Además de las emisiones de los combustibles utilizados en los equipos térmicos, se produce una emisión al aire de 0,003 kg de formaldehídos y de 0,078 kg de partículas de polvo.

Para cubrir la demanda térmica de la planta, por cada m<sup>3</sup> de tablero de partículas, el inventario considera principalmente: 1.100 MJ procedentes de virutas de madera residuales, 154 MJ de gas natural, y 86,1 MJ de gasóleo y fueloil respectivamente; mientras que el consumo eléctrico en planta es de 104 kWh. Además se necesitan 0,304 m<sup>3</sup> de agua para refrigeración de los procesos en planta.

Sustancia	Unidad	Cantidad (uso interior)	Cantidad (uso exterior)
Energía (poder calorífico superior), en forma de biomasa	MJ	23,95	23,97
Dióxido de carbono, en el aire	kg	2,16	2,16
Gas natural, en terreno	m <sup>3</sup>	0,14	0,13
Grava, en terreno	kg	0,11	0,12
Petróleo, crudo, en terreno	kg	0,06	0,15
Carbón, antracita, genérico, en terreno	kg	0,05	0,06
Carbón, lignito, en terreno	kg	0,02	0,04
Agua, enfriamiento, origen natural genérico	m <sup>3</sup>	-	0,02

Tabla 3.58. Datos de inventario: principales materias primas para la fabricación de 1 kg de tablero de madera aglomerado (valor de corte=1%)

Nuevamente la energía incorporada en este producto es básicamente de origen biomásico, aunque hay que destacar la contribución de la fabricación de resinas (17%), los consumos eléctricos (7%), así como la producción de parafina y gas, con un 3% cada una. Si bien la incineración al final de la vida útil es el proceso que más contribuye al potencial de calentamiento global, hay que destacar también las emisiones asociadas a la fabricación de resinas que son de 0,248 kg CO<sub>2</sub>-Eq. Respecto a la huella hídrica, se debe principalmente al agua evaporada en las plantas termoeléctricas de carbón para satisfacer los consumos eléctricos del producto (31%) y a la fabricación de las resinas (27%). En cuanto a la puntuación única se debe a la fabricación de resinas (47%), la incineración (25%), el consumo eléctrico (8%), así como la producción de parafina y gas, con un 8% cada una.

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida			Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Disposición Final (incineración)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	34,03 (38,90)	0,33	0,29	34,65 (39,51)
	98,2%	0,9%	0,8%	
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	-1,53 (-1,42)	0,02	1,55	0,04 (0,15)
	-49,4%	0,6%	49,9%	
Huella hídrica (l)	7,24 (25,77)	0,15	1,40	8,79 (27,31)
	82,4%	1,7%	15,9%	

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida			Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Disposición Final (incineración)	
Puntuación única (mPt)	36,38 (49,32)	1,76	12,46	50,59 (63,54)
	71,9%	3,5%	24,6%	

Tabla 3.59. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de tablero de madera aglomerado de uso interior. Nota: Entre paréntesis se indican los impactos en caso de madera aglomerada de uso exterior, que como se puede observar son superiores

El tablero de partículas orientadas (OSB: Oriented Strand Board) es básicamente un tablero de partículas hechas de filamentos de gran tamaño -con un grosor de hasta 0,5 cm y una longitud de 7,6-15 cm- colocadas en direcciones transversales. Debido al tamaño de los filamentos, la fabricación de tableros OSB necesita cantidades relativamente grandes de pegamento, lo cual repercute directamente en un mayor impacto de fabricación tal como muestra la siguiente tabla. Si bien existen varios tipos de tableros OSB, los impactos siguientes se refieren al OSB de tipo 3 (UNE-EN 300:1997) utilizado habitualmente como elemento estructural.

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida			Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Disposición Final (incineración)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	35,72	0,33	0,29	36,33
	98,3%	0,9%	0,8%	
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	-0,95	0,02	1,55	0,62
	-37,7%	0,8%	61,6%	
Huella hídrica (l)	23,22	0,15	1,40	24,76
	93,8%	0,6%	5,7%	
Puntuación única (mPt)	53,41	1,76	12,46	67,62
	79,0%	2,6%	18,4%	

Tabla 3.60. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de tablero OSB

#### 3.2.4.4. Medidas de ecoeficiencia propuestas para productos de madera

En general, todos los productos de madera analizados presentan unos impactos muy reducidos en comparación con otros materiales, debido a su bajo nivel de procesado industrial, que incluye procesos de bajo impacto como el serrado, lijado, secado, encolado o prensado. La energía incorporada tiene un origen mayoritariamente biomásico, representando el 84% de la energía primaria del ciclo de vida en el caso de las maderas blandas aserradas, y el 70-75% para las maderas laminadas y los tableros de partículas, debido a su mayor procesado. Además el balance de CO<sub>2</sub> considerando las etapas de fabricación y transporte es negativo, o lo que es lo mismo, el CO<sub>2</sub> absorbido del aire durante el crecimiento de la madera (estimado en 1 tCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de madera) es mayor que el emitido en dichas etapas. Evidentemente los impactos son mucho mayores si se utilizasen maderas exóticas tropicales (como el bambú o el iroko), donde el impacto del transporte puede llegar a anular las ventajas medioambientales de la madera, por lo que siempre hay que tener presente el aprovechamiento de estos materiales en entornos locales.

A partir de lo anterior, se pueden proponer las siguientes medidas de mejora:

#### **Promover el diseño de edificios con estructura de madera certificada:**

La madera laminada utilizada como elemento estructural en los edificios presenta un comportamiento mejor que los tradicionales troncos de madera, ya que en su fabricación se eliminan las irregularidades de la madera natural a través de una cuidadosa selección de las láminas. Esto permite obtener un material con una apariencia y, sobre todo, una resistencia mucho más homogénea.

Además, las estructuras de madera laminada ofrecen un comportamiento ante el fuego superior al de las estructuras metálicas de acero u hormigón armado, ya que al quemarse se forma una capa superficial de carbón vegetal que protege del fuego el centro de la viga de madera.

Las estructuras de madera son las que presentan un menor impacto en emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub>, a la vez que un menor coste económico. Suponiendo que dicha estructura se recicla o reutiliza completamente al final de su vida útil, las estructuras de hormigón armado presentan un aumento en las emisiones del 118% con un sobrecoste económico de más de un 12%, mientras que en las de acero, el aumento es del 252%. Además, desde el enfoque del ciclo de vida, la madera estructural en los edificios constituye un auténtico “almacén de CO<sub>2</sub>” a promover, ya que el CO<sub>2</sub> capturado durante la etapa de crecimiento de la madera permanece confinado en el edificio durante un periodo de más de 50 años.

Conviene destacar la importancia de que la madera sea certificada, para garantizar que los productos utilizados hayan sido auditados y provengan de bosques bien gestionados desde los puntos de vista socioeconómico y medioambiental, evitando la destrucción de masa arbórea, la tala ilegal, la explotación abusiva de las personas y la pérdida de biodiversidad. El incremento medio en precio de la madera certificada se estima en un 10%.

De los distintos sistemas de certificación existentes se recomienda el FSC (Consejo de Gestión Forestal), que garantiza una gestión ecoeficiente en toda la cadena de transformación de la madera, contando con un mayor apoyo de organizaciones ecologistas y sociales.

Por todo ello, las Administraciones deberían promover el diseño de nuevos edificios con estructura de madera certificada, introduciendo modificaciones en el actual marco normativo edificatorio, y aplicando criterios de discriminación positiva en la adjudicación de obras a aquellos edificios diseñados con madera estructural certificada.

#### **Sustitución de resinas de urea-formaldehído y melamina-formaldehído por resinas naturales en los productos de madera:**

Para obtener unos impactos aún más bajos en la madera laminada y los tableros de madera aglomerada, se plantea la sustitución de las resinas utilizadas a base de urea-formaldehído y melamina-formaldehído de alto impacto específico, por resinas naturales cuyo impacto se puede considerar nulo. Aunque las cantidades de resina en los productos de madera no suelen ser muy elevadas, el uso de resinas naturales está justificado por el aumento en la calidad del aire interior de los edificios a lo largo de toda su vida útil. Además la obtención de dichas resinas

contribuiría a la creación de empleo y riqueza en áreas rurales, donde este oficio tradicional está actualmente en vías de extinción.

Categoría de impacto	Madera laminada de uso exterior	Tablero de madera aglomerado
Energía incorporada total (MJ-Eq)	25,897 (-7,2%)	28,851 (-16,7%)
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	0,480 (-16,5%)	0,019 (-46,5%)
Huella hídrica (l)	7,801 (-14,8%)	6,428 (-26,9%)
Puntuación única (mPt)	82,884 (-9,2%)	27,091 (-46,5%)

Tabla 3.61. Evaluación del impacto total del ciclo de vida de los productos de madera (1 kg) utilizando resinas naturales

### **Secado natural de la madera aserrada al aire libre en vez de secado en horno:**

El secado natural permite disminuir la humedad de la madera hasta un nivel del 20-25%. Si se requiere un nivel de humedad más bajo habría que utilizar un horno. Más hay que tener en cuenta que el tiempo de secado natural varía mucho en función del tipo de madera, su espesor, ubicación y época del año. Por ejemplo, para maderas de baja densidad (pino, abeto, etc.) con un espesor de 25 mm se necesitarían 15-30 días; en una época favorable del año (verano), mientras que para especies como el abeto, roble y abedul se requerirían en la época más desfavorable del año 200-300 días.

Por ello, la aplicación de esta medida podría obligar a aumentar el stock de madera para garantizar los suministros, conforme aumente la demanda de madera para la construcción.

Sustituir el secado en horno de la madera aserrada por su secado natural al aire libre, permite reducir aún más los impactos de los productos de madera, tal como muestra la Tabla 3.62.

Categoría de impacto	Secado natural
Energía incorporada total (MJ-Eq)	18,395 (-12,4%)
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	0,267 (-10,7%)
Huella hídrica (l)	4,192 (-18,1%)
Puntuación única (mPt)	58,105 (-7%)

Tabla 3.62. Evaluación del impacto total del ciclo de vida de la madera blanda aserrada (1 kg) sustituyendo secado en horno por secado natural

### **Reciclado o reutilización de los productos de madera:**

La incineración de los productos de madera analizados en este apartado produce CO<sub>2</sub> biogénico, que no se ve totalmente compensado por la absorción previa de CO<sub>2</sub> en la etapa de crecimiento de la masa forestal de la que procede, debido a las emisiones que se producen desde la obtención de la madera en los bosques hasta

que el producto final sale de planta y es instalado. Para conseguir una absorción neta de CO<sub>2</sub> en el ciclo de vida, la solución sería modificar la disposición final de los productos de madera, apostando por su reciclaje o reutilización en detrimento de su incineración, tal como se presenta en la Tabla 3.63. Obviamente la aplicabilidad de esta medida está condicionada por promover diseños de edificios desmontables al final de su vida útil.

Categoría de impacto	Madera blanda aserrada	Madera laminada de uso exterior	Tablero de madera aglomerado
Energía incorporada total (MJ-Eq)	20,797 (-0,9%)	27,604 (-1%)	34,359 (-0,8%)
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	-1,174 (-491,9%)	-0,975 (-269,8%)	-1,513 (-4.366,1%)
Huella hídrica (l)	3,944 (-22,9%)	7,757 (-15,3%)	7,388 (-15,9%)
Puntuación única (mPt)	51,621 (-17,3%)	78,810 (-13,6%)	38,137 (-24,6%)

Tabla 3.63. Evaluación del impacto total del ciclo de vida en los distintos productos analizados (1 kg) suponiendo su reciclado total

Además, el reciclaje de los residuos madereros para la elaboración de los tableros de partículas y otros productos produciría una disminución en los impactos de los nuevos productos creados (Rivela B., et al., 2006).

#### **Aprovechamiento de calores residuales de los procesos:**

Si bien la demanda térmica en los procesos productivos es baja, existe un potencial de aprovechamiento de pequeños calores residuales que se generan en los mismos. En la fabricación de madera laminada, el calor residual se estima en 463 MJ/m<sup>3</sup> de producto final, siendo de 375 MJ/m<sup>3</sup> en el caso de los tableros aglomerados. Suponiendo que fuera posible el aprovechamiento mediante sistemas de intercambio térmico del 50% de dichos calores residuales, los impactos de estos productos disminuirían ligeramente, tal como se indica en la Tabla 3.64.

Categoría de impacto	Madera laminada de uso exterior	Tablero de madera aglomerado
Energía incorporada total (MJ-Eq)	27,435 (-1,6%)	34,218 (-1,2%)
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	0,569 (-0,9%)	0,033 (-7,1%)
Huella hídrica (l)	9,104 (-0,6%)	8,686 (-1,2%)
Puntuación única (mPt)	90,448 (-0,9%)	48,569 (-4%)

Tabla 3.64. Evaluación del impacto total del ciclo de vida de los productos de madera (1 kg) mediante el aprovechamiento de calores residuales

Evaluando las anteriores medidas, la Figura 3.9 muestra una aproximación al modelo de Ahorro-Inversión para el sector maderero en España. Se ha excluido la evaluación del ahorro asociado al diseño de edificios con estructura de madera certificada, puesto que no puede considerarse como una medida de ahorro del sector, ya que el ahorro obtenido no repercute en este sector, sino en el sector del cemento y del acero, que serían los materiales estructurales sustituidos.

Al tratarse de productos que tienen un impacto intrínsecamente más reducido, el potencial de ahorro es obviamente menor al obtenido en otros sectores.

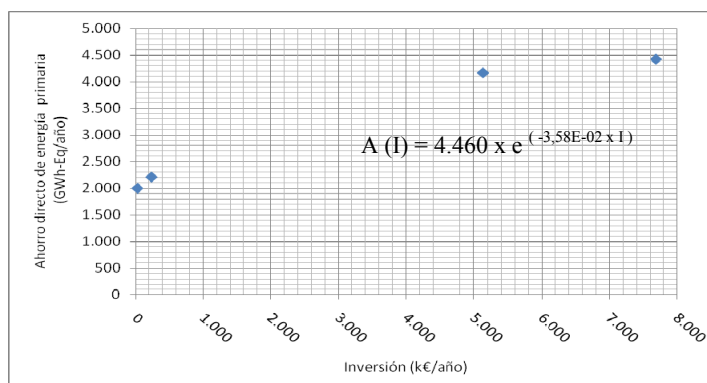


Figura 3.9. Curva Ahorro-Inversión del sector maderero en España

Al igual que sucedía con los aislamientos, la imposibilidad de obtener datos con suficiente nivel de desagregación sobre el nivel de producción del sector maderero introduce una mayor incertidumbre en la curva Ahorro-Inversión, por lo que debe entenderse como una primera aproximación. Además la baja inversión asociada a medidas como el secado al aire libre de la madera y la reutilización de los productos de madera hace que la ratio ahorro/inversión se dispare inicialmente, lo que aumenta el error del ajuste exponencial.

### 3.2.5. Materiales comunes

#### 3.2.5.1. Acero

La producción mundial de acero bruto ascendió en el año 2008 a 1.360 Mt, con un incremento del 1,5% respecto al año anterior, siendo China el primer productor mundial con 513 Mt/año, seguido de Japón con 123 Mt/año y Estados Unidos con 94 Mt/año. Ese mismo año, la extracción mundial de hierro, constituyente principal de acero, fue de 2,2 Mt, siendo China (35%), Brasil (18%) y Australia (15%) los países que encabezan el ranking mundial; mientras que las reservas estimadas de mineral de hierro son de 150 Mt (U.S. Geological Survey, 2009). En España, la producción de acero bruto en 2009 fue de 14,4 Mt, de la cual el 18% se exporta.

El acero es una aleación de hierro y carbono, en la que el carbono añadido para aumentar su resistencia no suele superar el 2% en peso de la aleación. Se trata de un material muy denso ( $7.900 \text{ kg/m}^3$ ) con una elevada conductividad térmica (50 W/mK) y una temperatura de fusión de  $1.400^\circ\text{C}$  aproximadamente.

Mientras que en Europa, el 39,8% del acero se produce en hornos eléctricos, y el 60,2% restante en los hornos con soplado de oxígeno, en España el acero producido en hornos eléctricos alcanza el 75%, reduciéndose este porcentaje a nivel mundial al 34% (IISI, 2002). Los datos de inventario utilizados en este estudio (Classen M., et al., 2007) consideran un mix de acero procedente de horno eléctrico (37%) y de horno de oxígeno (63%) e incluyen el proceso de laminado en caliente, que garantiza una sección constante, común para prácticamente cualquier aplicación del acero, como por ejemplo la fabricación de barras de acero corrugado (ferralla) utilizadas en las estructuras de hormigón armado.

La fundición directa de materiales que contienen hierro, como la chatarra se realiza generalmente en hornos de arco eléctrico. El material principal de entrada al horno es la chatarra ferrosa, que incluye la chatarra generada en la propia planta, residuos y desechos de fabricantes de productos de acero (como los fabricantes de vehículos) y chatarra procedente del productos reciclados por los consumidores. Al igual que en los hornos de oxígeno, se forma escoria a partir de cal, con objeto de retener componentes no deseados en el acero.

El proceso de producción de acero mediante horno eléctrico es un proceso discontinuo que permite obtener acero secundario y engloba las siguientes etapas: manipulación de las materias primas y almacenamiento, carga del horno con posible pretratamiento de la chatarra, fusión de la chatarra en el horno, tratamientos en hornos al vacío para ajustar la calidad del acero, colada continua para solidificar el acero líquido y gestión de la escoria. En el proceso se generan importantes emisiones de metales pesados (plomo, mercurio, etc.) y partículas que varían en función del tipo de chatarra utilizada. En cuanto a los residuos generados, el más relevante es la escoria, acabando mayoritariamente (69%) en vertederos.

Para producir 1 kg de acero mediante horno eléctrico se requieren 1,1 kg de chatarra ferrosa prensada y 0,055 kg de cal, 0,014 kg de carbón, 0,003 kg de electrodo de grafito y 0,424 kWh de electricidad. Se supone que los materiales anteriores se transportan 100 km por carretera y 200 km por ferrocarril, a excepción del electrodo que se transporta 600 km en ferrocarril.

La chatarra ferrosa se clasifica en chatarra “nueva” y chatarra “vieja”. La primera está formada por material excedente de los procesos de fabricación de productos de hierro y acero antes de que éstos lleguen al consumidor final, mientras que la segunda es la chatarra de hierro y acero que se recupera una vez que el producto ha sido utilizado por el consumidor.

Por otra parte, la producción de acero mediante un horno con soplado de oxígeno es un proceso discontinuo que permite obtener acero primario, constituido por las siguientes etapas: transferencia y almacenamiento de metal caliente, pretratamiento de metal caliente (desulfuración), oxidación en el horno (descarburación y oxidación de las impurezas), tratamientos metalúrgicos secundarios para ajustar la calidad del producto, y paso a lingoteras o colada continua para solidificar el acero líquido.

Para producir 1 kg de acero mediante horno con soplado de oxígeno se requieren 0,9 kg de arrabio, 0,213 kg de chatarra ferrosa, pequeñas cantidades de mineral de hierro, coque de carbón, cal, dolomita y 0,0715 kg de oxígeno. Además existen unos pequeños consumos de gas (0,0375 MJ) y electricidad (0,0219 kWh). Los materiales anteriores se transportan por carretera, ferrocarril y barco recorriendo distancias que varían entre 20 y 600 km.

El arrabio utilizado se produce habitualmente en un alto horno. Un alto horno es un sistema cerrado en el que los materiales portadores de hierro (mineral de hierro, sinterizado y/o pellets de hierro transportados por barco y ferrocarril), aditivos (formadores de escoria como la piedra caliza) y agentes reductores (como el coque) se alimentan continuamente por la parte superior del eje del horno a través de un sistema de carga que impide el escape de los gases del horno.

A su vez la producción de sinterizado y pellets de hierro requiere mineral de hierro reducido (65% en hierro) transportado en barco y ferrocarril y un consumo

energético (IPPC, 2000) de coque de carbón (supone el 85% de la energía de la planta), así como electricidad y gas (suponiendo respectivamente el 20% de la energía total).

Sustancia	Unidad	Cantidad
Hierro, 46% en mineral, 25% en mineral crudo, en terreno	kg	0,81
Carbón, antracita, genérico, en terreno	kg	0,68
Calcita, en terreno	kg	0,27
Energía (poder calorífico superior), en forma de biomasa	MJ	0,19
Grava, en terreno	kg	0,15
Gas natural, en terreno	m <sup>3</sup>	0,11
Carbón, lignito, en terreno	kg	0,06
Petróleo, crudo, en terreno	kg	0,05
Dióxido de carbono, en el aire	kg	0,02
Arcilla genérica, en terreno	kg	0,01
Agua, origen natural genérico	m <sup>3</sup>	0,01
Magnesita, 60% en mineral crudo, en terreno	kg	0,01
Arcilla, bentonita, en terreno	kg	0,01

Tabla 3.65. Datos de inventario: principales materias primas para la fabricación de 1 kg de acero (valor de corte=1%)

El proceso que más contribuye a la energía incorporada es la producción de arrabio (59%) para la fabricación de acero primario, debido principalmente al alto consumo de coque de carbón que requiere, seguida del laminado en caliente (20%), debido al consumo de gas asociado, y el consumo eléctrico para la fabricación del acero secundario. En cuanto al potencial de calentamiento global, la producción de arrabio representa el 61%, seguido del laminado en caliente con un 18%. Del mismo modo, la huella hídrica se debe principalmente a la producción de arrabio (39%), seguido del laminado en caliente (35%) y el consumo eléctrico en la fabricación de acero secundario (13%) debido al agua evaporada en las centrales eléctricas. Por último, en la puntuación única, vuelve a ser la producción de arrabio el proceso de más impacto (52%), debido en buena parte a la producción del sinterizado utilizado como materia prima, seguido del laminado en caliente (18%) y del consumo eléctrico para fabricar acero secundario (16%).

Por todo lo anterior se deduce que la producción de acero primario conlleva unos impactos muy superiores a los de la producción de acero secundario.

En cuanto a las sustancias, las que más contribuyen al impacto en energía incorporada son el carbón (53%) y el gas (18%). En cuanto al impacto en puntuación única hay que destacar la emisión de partículas al aire (37%) y el gas natural (12%).

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida			Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Disposición Final (vertedero)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	22,90 94,1%	0,33 1,3%	1,11 4,6%	24,34
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	1,44 94,3%	0,02 1,3%	0,07 4,4%	1,53
Huella hídrica (l)	25,53 97,6%	0,15 0,6%	0,47 1,8%	26,15
Puntuación única (mPt)	105,48 92,0%	1,76 1,5%	7,43 6,5%	114,67

Tabla 3.66. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de acero



### 3.2.5.2. Aluminio

La producción mundial de aluminio ascendió en el año 2008 a 39,7 Mt, con un incremento del 4,5% respecto al año anterior, siendo China el primer productor mundial con 13,5 Mt/año, seguido de Rusia con 4,2 Mt/año y Estados Unidos con 2,64 Mt/año. Ese mismo año, la extracción mundial de bauxita, materia prima a partir de la cual se obtiene el aluminio, fue de 205 Mt, siendo Australia (31%), China (16%) y Brasil (12%) los países que lideran el ranking mundial; mientras que las reservas de mineral de bauxita se estiman en 27.000 Mt (U.S. Geological Survey, 2009). Según la Asociación Española del Aluminio, la producción anual en nuestro país es de 1,4 Mt/año.

El aluminio es un metal ligero con una densidad de  $2.700 \text{ kg/m}^3$ , una conductividad térmica muy elevada ( $230 \text{ W/mK}$ ) y una baja temperatura de fusión ( $660^\circ\text{C}$ ). Puede producirse a partir de bauxita obteniendo aluminio primario, o bien a partir de chatarra “nueva” o “vieja” de aluminio reciclado.

Los datos de inventario utilizados en este estudio (Classen M., et al., 2007) consideran un mix de aluminio constituido por aluminio primario (68%), aluminio secundario de chatarra “nueva” (22%) y aluminio secundario de chatarra “vieja” (10%); en consonancia con el mix de la producción de aluminio a nivel mundial. Ello conlleva suponer, por término medio, un 32% de aluminio reciclado, variable en función de cada aplicación concreta. En cualquier caso este hecho contrasta con el elevado porcentaje de aluminio procedente de la construcción que se recicla (85%).

En la industria del aluminio secundario se procesa una amplia variedad de chatarra de aluminio que se clasifica como “nueva” o “vieja”, al igual que sucedía con la chatarra ferrosa. El proceso productivo comprende la fusión, aleación y fundición de la chatarra de aluminio en tochos (lingotes cilíndricos) de aluminio secundario.

Para producir 1 kg de aluminio secundario de chatarra “nueva” se requieren 1,01 kg de este tipo de chatarra, 0,0218 kg de elementos aleantes y pequeñas cantidades de elementos como argón, nitrógeno, cloro y sal. Se supone que la chatarra se transporta 100 km por carretera y 200 km por ferrocarril. El proceso conlleva un consumo térmico total de 3,113 MJ (principalmente de gas natural) y un consumo eléctrico de 0,174 kWh. Además se necesitan 78 l de agua evaporada en procesos de enfriamiento. En cuanto a las emisiones al aire, destaca la emisión de ácido clorhídrico ( $3,3\text{e-}05 \text{ kg}$ ) y de cloro ( $3,9\text{e-}06 \text{ kg}$ ).

A diferencia de la chatarra “nueva”, la chatarra “vieja” requiere de una clasificación y preparación previa que incluye su limpieza, prensado, etc. Para obtener 1 kg de chatarra “vieja” preparada se necesita recoger 1,23 kg de chatarra “vieja”. Además el proceso demanda pequeñas cantidades de energía eléctrica (0,064 kWh/kg) y térmica (1,186 MJ/kg) – principalmente gas natural- y requiere pequeñas cantidades de diversos aditivos como detergente, aceite hidráulico, ferrosilicio y cal, generando unas emisiones al aire de cloro ( $4,6\text{e-}07 \text{ kg/kg}$ ), partículas ( $2,898\text{e-}05 \text{ kg/kg}$ ) y ácido clorhídrico ( $1,1\text{e-}05 \text{ kg/kg}$ ). Asimismo se generan diversos residuos sólidos como aceites usados y residuos procedentes de recubrimientos orgánicos de la chatarra eliminados como residuos peligrosos, filtros de polvo inertes eliminados en vertedero, etc.

Para producir 1 kg de aluminio secundario de chatarra “vieja” se requieren 1,03 kg de chatarra “vieja” ya preparada, 0,0658 kg de elementos aleantes, 7,96 l de agua, y

pequeñas cantidades de elementos como de elementos como cloro, nitrógeno, ácido clorhídrico, hidróxido de sodio, ácido sulfúrico, cal y sal. Se supone que todos los elementos se transportan por carretera (entre 50 y 100 km) y ferrocarril (entre 100 y 600 km). El proceso conlleva un consumo térmico total de 8,783 MJ (principalmente de gas natural) y un consumo eléctrico de 0,288 kWh. Las emisiones al aire y los residuos sólidos en este proceso son del mismo tipo que los producidos en la preparación de la chatarra.

Por otra parte, la producción de aluminio primario se realiza por medio del proceso de Hall-Héroult, que data del año 1886 (Hudson L.K., et al., 1997). En este proceso el óxido de aluminio o alúmina ( $Al_2O_3$ ) se introduce en un baño de criolita, que consigue bajar la elevada temperatura de fusión de la alúmina ( $2.000^{\circ}C$ ) quedando en  $900^{\circ}C$  aproximadamente. La corriente eléctrica aplicada a través de los electrodos de carbono, en las celdas electrolíticas hace que el aluminio se vaya depositando en el fondo de las mismas. Para limitar las pérdidas de calor en las celdas, existe un aislamiento térmico a su alrededor. El aluminio líquido así obtenido es de una elevada pureza (99,5-99,9%).

Para producir 1 kg de aluminio primario líquido se requieren 1,92 kg de alúmina que debe ser transportada principalmente en barco una distancia media de 2.000 km, a lo que habría que añadir una pequeña distancia de 10-20 km por carretera y ferrocarril. Además se requieren 0,0016 kg de criolita, 0,0187 kg de fluoruro de aluminio, consumiéndose 0,448 kg del ánodo y 0,0181 kg del cátodo utilizados en la electrolisis. Todos estos elementos se transportan principalmente por carretera y ferrocarril. Hay que destacar que el proceso requiere un elevado consumo de electricidad, que se estima en 15,6 kWh. Las principales emisiones al aire son de monóxido y dióxido de carbono, fluoruros, partículas, óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre. Los residuos de carbono de la electrolisis no pueden ser reciclados, por lo que se eliminan a través de vertedero. El aluminio primario líquido obtenido de la electrolisis pasa seguidamente por un proceso de purificación hasta obtener lingotes de aluminio primario.

Para producir 1 kg de lingotes de aluminio primario líquido se necesita la misma cantidad de aluminio primario líquido, junto con diversos elementos aleantes, nitrógeno, argón, cloro y sales fundentes, todo ello transportado por ferrocarril y carretera. El proceso requiere de 4,71 l de agua evaporada para enfriamiento, 1,082 MJ térmicos (de gas y gasóleo) y 0,016 kWh eléctricos; generando emisiones al aire de fluoruros ( $1e-05$  kg).

El 98% de la producción mundial de óxido de aluminio se basa en el proceso Bayer, que data del año 1889. En este proceso, los componentes de aluminio de la bauxita molida se disuelven al añadir sosa cáustica (hidróxido de sodio) a alta presión y temperatura. Los restantes componentes de la bauxita (barro rojo) se separan y retiran por sedimentación y filtración, mientras que el aluminato de sodio pasa a un precipitador donde se depositan las partículas de hidróxido de aluminio. Después de filtrarlo, el hidróxido de aluminio se calcina en un horno a una temperatura de  $1000^{\circ}C$  para eliminar el agua retenida en la cristalización del hidróxido, obteniendo finalmente óxido de aluminio (alúmina).

Para producir 1 kg de alúmina se necesitan 2,142 kg de mineral de bauxita, que además debe recorrer grandes distancias entre la mina y la planta de producción. Se estima que la bauxita recorre una distancia media de 5.000 km en barco, 240 km en camión y 80 km en ferrocarril. Otras sustancias necesarias son: sosa cáustica (0,06 kg) y cal (0,05 kg), transportadas por carretera y ferrocarril, y agua (3,72 l). El

consumo energético es de 8,625 MJ de gas y gasóleo para procesos térmicos (como la calcinación) y 0,225 kWh eléctricos.

Sustancia	Unidad	Cantidad
Carbón, antracita, genérico, en terreno	kg	1,41
Carbón, lignito, en terreno	kg	0,83
Petróleo, crudo, en terreno	kg	0,83
Aluminio, 24% en bauxita, 11% en mineral crudo, en terreno	kg	0,79
Grava, en terreno	kg	0,72
Energía (poder calorífico superior), en forma de biomasa	MJ	0,64
Gas natural, en terreno	m <sup>3</sup>	0,44
Calcita, en terreno	kg	0,20
Agua, enfriamiento, origen natural genérico	m <sup>3</sup>	0,18
Cloruro de sodio, en terreno	kg	0,07
Dióxido de carbono, en el aire	kg	0,06
Hierro, 46% en mineral, 25% en mineral crudo, en terreno	kg	0,05
Arcilla genérica, en terreno	kg	0,04
Agua, río	m <sup>3</sup>	0,02
Gas en minas, procesos de extracción de carbón	m <sup>3</sup>	0,01

Tabla 3.67. Datos de inventario: principales materias primas para la fabricación de 1 kg de aluminio (valor de corte=1%)

Los distintos procesos necesarios para la producción de aluminio primario, principalmente el alto consumo eléctrico, la producción previa de alúmina y del ánodo utilizado en la electrolisis son los responsables todos los impactos. Así, el 95% de la energía incorporada del mix de aluminio considerado se debe a la producción de aluminio primario líquido que se reparte entre el consumo de electricidad (63%), producción de alúmina (19%) y fabricación del ánodo (12%). En cuanto al potencial de calentamiento global, el impacto se centra nuevamente en el aluminio líquido primario, repartiéndose principalmente entre el consumo eléctrico para el proceso de electrolisis (43%) y la producción de alúmina (19%). Por otra parte, el 72% de la huella hídrica se debe a la electricidad necesaria para la electrolisis y el 13% para la producción de alúmina. Hay que destacar que tan sólo el 8% de la huella hídrica se debe a la producción de aluminio secundario, correspondiendo el 92% restante al aluminio primario. Por último, en cuanto a la puntuación única, el 94% de debe a la producción de aluminio primario líquido, repartida entre la producción de alúmina (44%), donde la extracción de bauxita supone el 17% del impacto -incluyendo su transporte transoceánico (5%)-, el consumo eléctrico para la electrolisis (27%), y la fabricación del ánodo (11%). En cuanto a las sustancias, el petróleo (28%) y el carbón (20%) son las que más contribuyen a la energía incorporada, mientras que el petróleo (22%) y la emisión al aire de partículas (21%) son las que más contribuyen a la puntuación única. El agua evaporada en todos los distintos procesos de enfriamiento supone el 82% de la huella hídrica.

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida			Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Disposición Final (reciclado total en obra)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	136,48	0,33	0,00	136,80
	99,8%	0,2%	0,0%	
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	8,55	0,02	0,00	8,57
	99,8%	0,2%	0,0%	
Huella hídrica (l)	214,19	0,15	0,00	214,34
	99,9%	0,1%	0,0%	
Puntuación única (mPt)	556,56	1,76	0,93	559,24
	99,5%	0,3%	0,2%	

Tabla 3.68. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de aluminio

### 3.2.5.3. Cobre

Las reservas de mineral de cobre se estiman en 550 Mt. La producción mundial minera de cobre ascendió en el año 2008 a 15,7 Mt, con un incremento del 1,9% respecto al año anterior, siendo Chile el primer productor mundial con 5,6 Mt/año, seguido de Estados Unidos con 1,31 Mt/año y Perú con 1,22 Mt/año (U.S. Geological Survey, 2009).

El cobre es un material muy utilizado en las tuberías y cableado de los edificios. Se trata de un metal muy denso (8920 kg/m<sup>3</sup>), con una conductividad térmica muy elevada (380 W/mK) y una temperatura de fusión de 1.084°C. Puede producirse a partir de minerales oxidados -como la cuprita y la malaquita- o sulfurados -como la calcopirita, la calcosina y la bornita- obteniendo cobre primario, si bien el 90-95% del cobre producido a nivel mundial se obtiene de los minerales sulfurados. Adicionalmente el cobre puede producirse a partir de chatarra “nueva” o “vieja” de cobre reciclado, dando lugar a cobre secundario. Se estima que a nivel mundial el 34% del cobre es reciclado, mientras que en la Unión Europea la cifra supera el 40%.

Los datos de inventario utilizados en este estudio (Krauss U., et al., 1999) consideran un mix de cobre constituido por cobre primario (56%), cobre secundario de chatarra “nueva” (22%) y cobre secundario de chatarra “vieja” (22%); que se aproxima al mix de la producción de cobre a nivel europeo, lo que supone, por término medio, un 44% de cobre reciclado. A su vez, el cobre primario considerado está formado por un mix de cobre primario producido en Latinoamérica, el Caribe Indonesia y Europa. El mix de cobre considerado incluye todos los procesos de transporte, que, para este producto, vuelven a ser relevantes.

El cobre secundario se produce a partir de diversos tipos de chatarra de cobre. La chatarra “nueva” se puede reutilizar directamente en las fundiciones sin necesidad de tratamientos adicionales, mientras que la chatarra “vieja” debe tratarse en una fundición de cobre secundario. Dependiendo de su composición química, la chatarra “vieja” se transforma en distintos tipos de hornos: altos hornos (cuando tiene hasta un 30% de cobre), convertidores metalúrgicos (75% de cobre) , y hornos de ánodo (95% de cobre). En el proceso, la chatarra “vieja” se suele cargar en la parte superior de un alto horno una mezcla de chatarra de cobre y de hierro, piedra caliza, arena y coque de carbón. El “cobre negro” obtenido pasa posteriormente por un convertidor metalúrgico, siendo finalmente refinado en un horno de ánodo (EEA, 1999).

Para obtener 1 kg de cobre secundario de chatarra “vieja” se necesitan 1,421 kg de chatarra de cobre y diversas aleaciones, 0,0739 kg de piedra caliza y 0,0625 kg de arena. En el proceso se consume energía térmica (9,1 MJ/kg) – principalmente coque de carbón y fueloil para los hornos - y electricidad (1,1 kWh/kg), generando unas emisiones al aire que pueden contener compuestos orgánicos halogenados tales como dioxinas TCDD ( $5 \times 10^{-11}$  kg/kg) y 1 l/kg de aguas residuales a tratar en depuradora.

Por otra parte, la producción de cobre primario se puede realizar a partir de 2 técnicas: la hidrometalúrgica –utilizada con minerales oxidados- y la pirometalúrgica –utilizada con minerales sulfurados-, con unas cuotas del 9,4% y el 90,6% de cobre primario producido a nivel mundial, que se corresponden con los porcentajes considerados de cada tecnología en el inventario de cobre primario utilizado (Krauss U., et al., 1999).

No obstante, la hidrometalurgia es una técnica más reciente, y está desplazando progresivamente a la pirometalurgia tradicional, a pesar de que su impacto medioambiental en energía y huella de carbono es casi el doble. De cualquier forma, existen sinergias evidentes entre ambas técnicas. Por ejemplo, mientras que en la pirometalurgia se produce ácido sulfúrico, en la hidrometalurgia se consume. Por ello, la producción de cobre a medio-largo plazo se debería hacer en plantas que combinen dichos procesos.

El tratamiento pirometalúrgico de concentrados de cobre incluye tres etapas: secado-calentamiento (pretratamiento), fusión-conversión (reducción), y refinación. En la etapa de pretratamiento, el azufre se elimina en forma de dióxido de azufre y parte del hierro se oxida. En la fundición, se obtiene una solución de sulfuros fundidos que contiene el cobre y una escoria de silicato líquido que se elimina. En la etapa de conversión se elimina más azufre en forma de dióxido de azufre, se oxida y se elimina el hierro restante, dando lugar a un producto conocido como cobre “blíster” con una pureza del 98%. Por último la refinación consta de 3 fases: pirometalurgia o refinado a fuego, refinación electrolítica, y refundición de cátodos y moldeo de formas. Por su parte, el tratamiento hidrometalúrgico consta básicamente de un proceso de pretratamiento (molido del mineral), seguido de un proceso de lixiviación, donde se extrae sulfato de cobre del mineral mediante una solución de agua y ácido sulfúrico, que posteriormente se reduce en un proceso de electrólisis obteniéndose cátodos de cobre.

Para producir 1 kg de cobre primario se requieren 3,15 kg de cobre concentrado, además de 0,226 kg de piedra caliza, 0,263 kg de oxígeno y 4,41 l de agua que deben ser tratados posteriormente en depuradora. En el proceso se consume energía térmica (9,157 MJ/kg) – principalmente fueloil y gas - para los hornos - y electricidad (0,492 kWh/kg), produciendo además ácido sulfúrico (0,199 kg/kg).

A su vez, para producir 1 kg de cobre concentrado se necesitan 0,356 kg de mineral con un contenido típico del 0,36% de cobre, 0,99% de azufre, y  $8,2 \times 10^{-3}$ % de molibdeno extraído en minas a cielo abierto (70%) o bajo tierra (30%). En el proceso, agua (35,9 l/kg), cal y diversos agentes químicos (0,214 kg/kg) se añaden a unas celdas de flotación, donde las partículas previamente molidas de mineral que contienen cobre se separan de las partículas restantes, debido a su distinto grado de humedad. El consumo energético es principalmente eléctrico (0,735 kWh/kg) y las emisiones son básicamente polvo y partículas.

Sustancia	Unidad	Cantidad
Grava, en terreno	kg	0,85
Energía (poder calorífico superior), en forma de biomasa	MJ	0,63
Carbón, antracita, genérico, en terreno	kg	0,35
Cobre, 2,19% en sulfuros, 1,83%Cu + 8,2e-3%Mo en mineral crudo, en terreno	kg	0,33
Calcita, en terreno	kg	0,28
Cobre, 1,18% en sulfuros, 0,39%Cu + 8,2e-3%Mo en mineral crudo, en terreno	kg	0,25
Petróleo, crudo, en terreno	kg	0,21
Gas natural, en terreno	m <sup>3</sup>	0,20
Carbón, lignito, en terreno	kg	0,14
Hierro, 46% en mineral, 25% en mineral crudo, en terreno	kg	0,11
Arcilla genérica, en terreno	kg	0,09
Cobre, 1,42% en sulfuros, 0,81%Cu + 8,2e-3%Mo en mineral crudo, en terreno	kg	0,07

Tabla 3.69. Datos de inventario: principales materias primas para la fabricación de 1 kg de cobre (valor de corte=1%)

El mix de producción de cobre primario considerado, principalmente debido al alto consumo eléctrico, es el responsable principal de todos los impactos. Tan solo el 17% de la energía incorporada del mix de cobre considerado se debe a la producción de cobre secundario. Los procesos del mix que más contribuyen a este impacto son la producción eléctrica (59%) y de fueloil (21%), así como el transporte de materias primas (9%). En cuanto al potencial de calentamiento global, el impacto se centra nuevamente en el cobre primario (80%), y los procesos que más contribuyen al mix son nuevamente la producción eléctrica (33%) y de fueloil (18%) y el transporte (9%). Del mismo modo, la producción eléctrica es el proceso de mayor huella hídrica, con una contribución del 30%; teniendo el cobre secundario una contribución del 20% sobre el mix considerado; mientras que en la puntuación única el impacto del cobre secundario se limita a un 5%. En cuanto a las sustancias, el petróleo (27%), el gas (5%) y el carbón (3%) son las que más contribuyen a la energía incorporada, mientras que el mineral de cobre (25%), el cadmio (12%) y la emisión al aire de partículas (10%) son las que más contribuyen a la puntuación única.

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida			Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Disposición Final (reciclado total en obra)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	35,26	0,33	0,00	35,59
	99,1%	0,9%	0,0%	
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	1,98	0,02	0,00	2,00
	99,0%	1,0%	0,0%	
Huella hídrica (l)	77,65	0,15	0,00	77,79
	99,8%	0,2%	0,0%	
Puntuación única (mPt)	2064,53	1,76	0,93	2.067,22
	99,9%	0,1%	0,0%	

Tabla 3.70. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de cobre

### 3.2.5.4. PVC

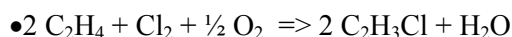
El policloruro de vinilo (PVC): (CH<sub>2</sub>CHCl)<sub>n</sub> es uno de los plásticos más antiguos. Su primera polimerización se remonta a 1872, mientras que la producción de su monómero se hizo por vez primera en 1835. En España la capacidad de producción de PVC es de casi 500 kt/año, más de la mitad destinada a tuberías.

Dependiendo del proceso utilizado para la polimerización, el tamaño de las partículas del PVC es diferente: de 100 a 180  $\mu\text{m}$ , para el PVC en suspensión o en bloque, o de 0,1 a 3  $\mu\text{m}$ , para el PVC en emulsión.

Los materiales de partida para la producción de PVC son el etileno y el cloro, que inicialmente reaccionan entre sí para producir 1,2-dicloroetano. Esta sustancia se descompone a alta temperatura (mediante cracking) para formar cloruro de vinilo y ácido clorhídrico. El exceso de ácido clorhídrico reacciona con el etileno y el oxígeno para formar 1,2-dicloroetano, que nuevamente es descompuesto en cloruro de vinilo y ácido clorhídrico.

- Cloración directa:  $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{Cl}_2 \Rightarrow \text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$
- Producción de cloruro de vinilo:  $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2 \Rightarrow \text{C}_2\text{H}_3\text{Cl} + \text{HCl}$
- Oxicloración:  $2 \text{HCl} + \text{C}_2\text{H}_4 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \Rightarrow \text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O}$

Por tanto, la reacción global a partir de las tres reacciones anteriores es:



Por último, el cloruro de vinilo (monómero) se polimeriza para producir PVC. Para ello se utiliza un 0,8% (respecto al peso del monómero) de peróxido de benzoílo. La polimerización se desarrolla durante un tiempo de 17 horas a una temperatura de 58 °C en un cilindro rotativo con bolas de acero inoxidable en su interior.

Para la obtención del monómero se requiere producir previamente cloro a partir de 0,627 kg de cloruro de sodio (por cada kilogramo de monómero), así como etileno, para lo que se necesitan 0,452  $\text{Nm}^3$  de gas natural y 0,461 kg de petróleo para producir nafta (por cada kilogramo de monómero). Para la obtención del PVC, estas cantidades se incrementan. Por ejemplo, para producir PVC en emulsión, se necesita un 34% más de gas natural y un 11% más de petróleo.

Los datos de inventario utilizados en este apartado, se basan en un estudio de 56 plantas europeas, y corresponden a un promedio de la producción de los tres tipos de PVC más habituales en Europa (Boustead I., 2005) a partir de la siguiente distribución: 85% de PVC en suspensión, 10% de PVC en emulsión y 5% de PVC en bloque. Se considera que el transporte de las materias primas se realiza mediante camión (100 km) y tren (200 km).

Sustancia	Unidad	Cantidad
Cloruro de sodio, en terreno	kg	0,63
Gas natural, en terreno	$\text{m}^3$	0,56
Petróleo, crudo, en terreno	kg	0,48
Carbón, antracita, genérico, en terreno	kg	0,16
Carbón, lignito, en terreno	kg	0,07
Grava, en terreno	kg	0,04
Calcita, en terreno	kg	0,03

Tabla 3.71. Datos de inventario: principales materias primas para la fabricación de 1 kg de PVC (valor de corte=1%)

La producción del cloruro de vinilo a partir del cual se produce el PVC conlleva los mayores impactos, debido a la gran cantidad requerida de petróleo (33% de la

energía incorporada total) y gas (32% de la energía incorporada total) principalmente. De hecho, sólo durante la fabricación del monómero se incorpora el 73% de la energía incorporada total en el PVC. La producción de PVC en suspensión, principal proceso considerado en este análisis, supone (incluyendo la producción previa del monómero) el 66% de la energía incorporada, el 37% de las emisiones de CO<sub>2</sub>-Eq, el 74% de la huella hídrica y el 63% de la puntuación única. Otro proceso a destacar es la incineración del PVC al final de su vida útil que supone el 57% de las emisiones de CO<sub>2</sub>-Eq y el 21% de la puntuación única. Conviene reseñar que el 96% del agua requerida se evapora en procesos de enfriamiento. Por último, las principales sustancias que contribuyen a la puntuación única son el petróleo (35%), el gas (34%), así como las emisiones de CO<sub>2</sub> (10%) y de NO<sub>x</sub> (7%).

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida			Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Disposición Final (incineración)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	60,33	0,33	12,55	73,21
	82,4%	0,4%	17,1%	
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	1,97	0,02	2,28	4,27
	46,2%	0,5%	53,3%	
Huella hídrica (l)	454,79	0,15	57,07	512,00
	88,8%	0,0%	11,1%	
Puntuación única (mPt)	174,20	1,76	45,54	221,51
	78,6%	0,8%	20,6%	

Tabla 3.72. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de PVC

### 3.2.5.5. Vidrio plano

El vidrio es un material de una gran dureza y fragilidad, que se ha utilizado desde la antigüedad por los egipcios (1.500 a.C.), extendiéndose su uso posteriormente a través del Imperio Romano. En la actualidad, la fabricación de vidrio plano es un negocio completamente globalizado y dominado por cinco grandes grupos: Asahi (Japón), Pilkington (Reino Unido), Saint-Gobain (Francia), PPG Industries (EE.UU.), y Guardian Industries (EE.UU.). El vidrio plano es el segundo producto más importante de la industria del vidrio en la Unión Europea, representando alrededor del 22% de la producción total de vidrio (IPCC, 2001) con una producción en la UE-27 de más de 9,5 Mt/año en 2007; y más de 1,1 Mt/año en España. La siguiente tabla muestra las materias primas utilizadas comúnmente en la fabricación de vidrio plano (De Jong, 1997). El material principal es la arena, a la que se añade carbonato de sodio, para que ésta funda a menor temperatura, y piedra caliza, con objeto de evitar que el cristal pueda descomponerse en el agua.

		Peso (kg/kg de vidrio)
Piedra caliza	CaCO <sub>3</sub>	0,154
Dolomita	MgCO <sub>3</sub>	0,086
Feldespatos	6SiO <sub>2</sub>	0,148
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,007
	K <sub>2</sub> O	0,003
	Na <sub>2</sub> O	0,002
Arena de sílice	SiO <sub>2</sub>	0,578
Carbonato de sodio / torta de sal	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,229
Peso TOTAL		1,207

Tabla 3.73. Materias primas para la fabricación del vidrio plano



Las emisiones de CO<sub>2</sub> geogénico de las sustancias anteriores se calculan sobre la base de la composición del producto final y la cantidad de materias primas utilizada. Dichas emisiones ascienden a 0,208 kg CO<sub>2</sub>; 0,068 kg CO<sub>2</sub> procedentes de la piedra caliza, 0,045 kg CO<sub>2</sub> de la dolomita y 0,095 kg CO<sub>2</sub> del carbonato de sodio.

Desde el punto de vista energético, el principal proceso en la fabricación del vidrio es la fusión de las materias primas (principalmente arena de sílice, carbonato de sodio y caliza) en un horno térmico (de gas o fueloil) a una temperatura de 1.300-1.550 °C. El flujo de cristal fundido que sale del horno se pasa luego por un baño de estaño, donde el vidrio se va enfriando y solidificando, dando lugar a una superficie plana debido al efecto de la gravedad y la tensión superficial. A la salida del baño de estaño, el vidrio, pegajoso y viscoso pero con la suficiente consistencia para ser trasladado mediante rodillos, entra en un horno-túnel donde es recocido (sin llegar a fundirse) con objeto de eliminar las tensiones internas del material. Posteriormente se enfría y se corta con un cabezal de diamante.

Los vertidos de agua en el proceso son despreciables, ya que el agua se utiliza principalmente para limpieza, procesos de enfriamiento y humidificación; y suele tratarse en la propia planta antes de su vertido. Los residuos sólidos son igualmente despreciables, debido a que el 99% del vidrio residual (rechazos, piezas dañadas) se recicla en la propia planta.

Sustancia	Unidad	Cantidad
Grava, en terreno	kg	0,77
Calcita, en terreno	kg	0,52
Energía (poder calorífico superior), en forma de biomasa	MJ	0,23
Gas natural, en terreno	m <sup>3</sup>	0,17
Cloruro de sodio, en terreno	kg	0,12
Petróleo, crudo, en terreno	kg	0,11
Carbón, antracita, genérico, en terreno	kg	0,08
Carbón, lignito, en terreno	kg	0,05
Arcilla genérica, en terreno	kg	0,02
Dióxido de carbono, en el aire	kg	0,02
Hierro, 46% en mineral, 25% en mineral crudo, en terreno	kg	0,02

Tabla 3.74. Datos de inventario: principales materias primas para la fabricación de 1 kg de vidrio plano (valor de corte=1%)

El vidrio analizado tiene un espesor promedio de 4 mm y una densidad de 2.500 kg/m<sup>3</sup> y posee un revestimiento metálico para mejorar el control de la transmisión y reflexión de la radiación solar incidente. Los datos de inventario utilizados en este estudio incluyen el suministro de materias primas, los procesos de fusión, formación y enfriamiento, así como los procesos de corte y de almacenamiento, el transporte interno y la propia infraestructura de la planta de producción del vidrio. La energía necesaria es principalmente gas natural (4,56 MJ/kg de vidrio, 58%) y fueloil (0,074 kg/kg de vidrio; 38%), además de un pequeño consumo de electricidad (0,111 kWh/kg de vidrio; 5%). La cantidad de estaño añadida en el baño de estaño (9,16e-06 kg/kg de vidrio) abandona el sistema en forma de emisión de partículas al aire.

Se supone que el vidrio plano producido se transporta a otra planta, mediante tren (600 km) y camión (100 km), para incorporar el recubrimiento metálico. Las materias primas utilizadas para este recubrimiento son principalmente bismuto, plata, cromo y níquel (en total: 1,19e-04 kg/kg de vidrio). Dichas sustancias se pulverizan sobre la superficie del vidrio en condiciones de vacío, los átomos del metal se vaporizan y se depositan finalmente en una fina película sobre la

superficie del vidrio. En este proceso, los consumos energéticos de gas (5,29e-05 MJ/kg de vidrio) y electricidad (0,068 kWh/kg) son muy pequeños.

En la fabricación de vidrio plano con revestimiento metálico el proceso de más impacto se produce en la fabricación del vidrio, que supone el 81-84% de los cuatro impactos analizados. Los procesos que más contribuyen a la energía incorporada son la producción de gas natural (37%) y de fueloil (27%) para su consumo en planta, así como la producción de una de las materias primas como es el carbonato de sodio (9%), que requiere de consumos importantes de gas y carbón en horno. Respecto al potencial de calentamiento global, las emisiones de CO<sub>2</sub> en la planta de vidrio (el 42% en la combustión del horno y el 18% de origen geogénico procedente de las materias primas utilizadas) suponen la mayor contribución, seguido de la producción de carbonato de sodio (10%), y la generación eléctrica para su consumo en planta (8%). Casi la mitad de la huella hídrica (49%) corresponde a la producción de carbonato de sodio, mientras que el 17% se debe al consumo de agua necesario (principalmente en las plantas de carbón) para la producción eléctrica. Obviamente las sustancias que más contribuyen al impacto, son el gas (42% de la energía incorporada y 26% de la puntuación única) y el petróleo (34% de la energía incorporada y 21% de la puntuación única). Otras sustancias a considerar en la puntuación única son las emisiones de NO<sub>x</sub> (16%) y de SO<sub>2</sub> (11%).

Categoría de impacto	Etapa del ciclo de vida			Impacto Total
	Fabricación	Transporte a la obra	Disposición Final (vertedero)	
Energía incorporada total (MJ-Eq)	14,94	0,33	0,25	15,51
	96,3%	2,1%	1,6%	
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	1,11	0,02	0,01	1,14
	97,4%	1,7%	0,9%	
Huella hídrica (l)	16,16	0,15	0,23	16,54
	97,7%	0,9%	1,4%	
Puntuación única (mPt)	79,22	1,76	1,15	82,13
	96,5%	2,1%	1,4%	

Tabla 3.75. Evaluación del impacto del ciclo de vida de 1 kg de vidrio plano

### 3.2.5.6. Medidas de ecoeficiencia propuestas para materiales comunes

La industria primaria de fabricación de metales como el acero, aluminio o cobre contribuye al agotamiento de las reservas de hierro, bauxita y cobre, y engloba procesos de alto impacto energético como la pirometalurgia o la electrolisis. Además, se trata de productos de carácter global, con elevadas necesidades de transporte, que en el caso del aluminio ascienden a 32.000 kg\*km, siendo de 13.800 kg\*km en el caso del cobre y de 6.800 kg\*km en el caso del acero.

La extracción intensiva de cobre ha causado que más del 50% de las reservas mundiales de este mineral estén agotadas, siendo esta tasa de agotamiento algo menor en el caso del hierro (28%) y del aluminio (15%), debido a su mayor abundancia (Valero Delgado A., 2008). Si se mantienen las actuales tasas de extracción, las reservas de mineral de cobre sólo durarán 68 años y las de mineral de hierro tan sólo 63 años (Valero A., Valero A., Mudd G., 2009). La extracción de minerales produce una disminución significativa en la exergía del stock natural de nuestro planeta. Esta degradación exérgica se concentra principalmente en los tres minerales analizados en este apartado: el hierro, con un 63% del total, el

aluminio, con un 24% y el cobre, con un 6% (Valero Delgado A., Valero Capilla A., 2009).

De acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, cuando la concentración de un recurso tiende a cero, la energía requerida para extraer el mineral tiende a infinito. Por ello, es evidente que la calidad y grado de concentración de los minerales que quedan sin extraer es cada vez menor, aumentando los costes de extracción, por lo que el coste energético de los productos elaborados a partir de minerales será cada vez mayor y absolutamente insostenible.

Todos los materiales analizados en este apartado presentan un bajo porcentaje de la fracción renovable en su indicador de energía primaria incorporada, siendo del 15-17% para el aluminio y el cobre, y tan sólo del 2-4% para el acero, el PVC y el vidrio.

Seguidamente se detallan las soluciones propuestas para estos materiales:

#### **Promoción de la industria secundaria del acero, aluminio y cobre y limitación de las extracciones minerales:**

Mediante un diseño que facilite el desensamblaje, sería posible recuperar hasta el 98% del acero de un edificio y reciclarlo completamente para la fabricación de acero nuevo hasta el 95% sin que se produzcan cambios en las especificaciones técnicas del acero. Además, mediante la tecnología de hornos de arco eléctrico es posible producir acero utilizando únicamente acero secundario, aplicable a la mayor parte de aceros utilizados en el sector de la construcción (Wadel G., 2009). Lo mismo se podría decir del aluminio y el cobre, que pueden ser totalmente reciclados, sin que se produzcan alteraciones en sus propiedades físico-químicas.

Promover la industria secundaria en detrimento de la industria primaria conlleva una importante disminución de los impactos, permitiendo convertir los residuos metálicos en materias primas y preservando las reservas minerales. Tal como muestra la Tabla 3.76, la producción de acero secundario en horno eléctrico, a partir de chatarra ferrosa reciclada, en detrimento del acero primario producido en horno de oxígeno a partir de mineral de hierro, conlleva una disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> del 75%. Del mismo modo, la producción de aluminio secundario a partir de aluminio reciclado, en sustitución del aluminio primario obtenido por electrolisis de la alúmina producida a su vez a partir de bauxita, disminuye las emisiones en un 93%; mientras que la producción de cobre secundario a partir de cobre reciclado, en vez del cobre primario obtenido mediante pirometalurgia utilizando mineral de cobre concentrado permite disminuir las emisiones en un 65%.

Categoría de impacto	Fabricación de acero		Fabricación de aluminio			Fabricación de cobre		
	Primario (horno O <sub>2</sub> )	Secundario (horno eléctrico)	Primario	Secundario de chatarra "nueva"	Secundario de chatarra "vieja"	Primario	Secundario de chatarra "nueva"	Secundario de chatarra "vieja"
Energía incorporada total (MJ-Eq)	23,53	8,46	194,5	8,08	23,73	48,57	0,85	27,33
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	1,62	0,41	12,23	0,41	1,38	2,64	0,05	1,78
Huella hídrica (l)	20,83	9,04	284,54	82,68	27,36	120,53	0,82	30,93
Puntuación única (mPt)	106,13	49,2	784,5	46,31	125,98	3739,45	4,64	424,22

Tabla 3.76. Evaluación del impacto del ciclo de vida en la fabricación de metales (acero, aluminio y cobre) primarios y secundarios

Del mismo modo, en la siguiente tabla se muestra claramente la disminución de impactos cuando en la fabricación de cada metal, se aumenta el porcentaje de metal secundario, según distintos mixes.

Categoría de impacto	Acero		Aluminio		Cobre	
	Mix con 50% acero secundario	Mix con 75% acero secundario (España)	Mix con 50% aluminio secundario (35% "nuevo" + 15% "viejo")	Mix con 85% aluminio secundario (60% "nuevo" + 25% "viejo")	Mix con 60% cobre secundario (30% "nuevo" + 30% "viejo")	Mix con 80% cobre secundario (40% "nuevo" + 40% "viejo")
Energía incorporada total (MJ-Eq)	22,38 (-8%)	18,61 (-23,5%)	103,97 (-24%)	40,28 (-70,6%)	29,53 (-17%)	21,97 (-38,3%)
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	1,37 (-10,3%)	1,07 (-30,1%)	6,49 (-24,3%)	2,45 (-71,5%)	1,69 (-15,3%)	1,31 (-34,3%)
Huella hídrica (l)	24,62 (-5,9%)	21,67 (-17,1%)	175,46 (-18,1%)	99,28 (-53,7%)	60,11 (-22,7%)	38,06 (-51,1%)
Puntuación única (mPt)	107,27 (-6,5%)	93,03 (-18,9%)	430,04 (-23,1%)	179,64 (-67,9%)	1537,52 (-25,6%)	877,31 (-57,6%)

Tabla 3.77. Evaluación del impacto del ciclo de vida total de 1 kg de metal en función del porcentaje de producción de metal secundario

Si se quisiera reponer con la tecnología actual todo el capital mineral extraído durante el siglo pasado, se necesitaría como mínimo una energía equivalente a la tercera parte de todas las reservas de petróleo mundiales (Valero Delgado A., Valero Capilla A., 2009). Por ello es imprescindible llegar a acuerdos internacionales que limiten drásticamente las extracciones minerales y apuesten decididamente por incrementar sus tasas de reciclaje al nivel máximo posible.

### **Reducción del uso de PVC y sustitución progresiva por otros materiales termoplásticos:**

En varios centenares de municipios del norte y centro de Europa se ha limitado o eliminado la utilización de PVC en edificios públicos. El PVC presenta unos altos impactos energéticos (20,3 kWh/kg) y ambientales (4,3 kg CO<sub>2</sub>-Eq/kg), tiene un alto contenido en cloro y sus posibilidades de reciclado son escasas, debido a la menor calidad del PVC reciclado y a las emisiones de sustancias tóxicas (como el ácido clorhídrico) durante su pulverización. Por ello, sería conveniente una sustitución gradual y progresiva de este material por otros de menor impacto.

En tuberías y cableados, el PVC se podría sustituir por polietileno y/o polipropileno, con unas emisiones y energía incorporada similares y un mayor coste económico, pero con menor toxicidad; mientras que en marcos de ventanas; se debería fomentar el uso de madera, cuyo impacto en emisiones es 5 veces menor.

### **Mejora de la eficiencia energética en el proceso de fabricación del vidrio plano:**

La fabricación de vidrio plano conlleva un elevado consumo de energía, que se sitúa entre el 20% y 30% de los costes de producción; además de emisiones de NOx. Para reducir estos impactos se proponen diversas soluciones.

En primer lugar, la sustitución al final de su vida útil de hornos de recuperación (cuya eficiencia es del 20%) por hornos regenerativos (con una eficiencia energética del 50%), permitiría aprovechar mejor la temperatura de los gases de la combustión para precalentar el aire necesario a una mayor temperatura (hasta 1.400°C frente a 800°C), debido a la eliminación de los intercambiadores-recuperadores.

La sustitución del fuel-oil, tradicionalmente utilizado en la industria del vidrio por gas natural (que actualmente representa el 82% del consumo de este sector en España) como combustible en los hornos conlleva una disminución del 30% en las emisiones de CO<sub>2</sub>, disminuyendo también las partículas y óxidos de azufre, a pesar de que la llama del gas al ser algo menos radiante, puede incrementar algo el consumo de energía. No obstante, en la actualidad dicho consumo tiende a reducirse mediante un adecuado diseño del horno, con una mejora en los materiales refractarios, una adecuada geometría que mejora la transmisión energética a través de la masa vitrificable, disminuyendo la temperatura de la superficie del vidrio, y un adecuado posicionamiento de los quemadores que optimiza la velocidad, la dirección y la combustión del gas.

Por otra parte, la reducción de la relación aire/gas a niveles estequiométricos y sellado de las paredes del horno y cámaras permitiría controlar que la cantidad de aire que se emplea para la combustión del gas sea la menor posible, reduciendo la entrada de aire parásito para disminuir las emisiones de NOx. En este sentido, sería recomendable también la utilización de quemadores de bajo NOx y baja impulsión para reducir los picos en las temperaturas de llama, consiguiendo una mezcla más lenta entre el gas y el aire de combustión, aumentando la radiación de las llamas, a la vez que se disminuye la volatilización de los óxidos de sodio procedente del baño de vidrio fundido.

Finalmente, el aumento progresivo de la cantidad de casco de vidrio reciclado empleado como materia prima permitiría reducir el volumen de residuos y el consumo de combustible en la fabricación, ya que el vidrio reciclado necesita menos energía para fundirse que las materias primas, consiguiendo un 2% de ahorro en energía por cada 10% de vidrio reciclado. Además se reduciría la cantidad de materias primas utilizadas (1 t de vidrio reciclado ahorra 1,2 t de materias primas) y, a su vez, de las emisiones de proceso por la descarbonatación. El vidrio reciclado puede reintroducirse en el proceso sin que el producto final cambie sus propiedades. Los vidrios planos que no incorporen tratamientos superficiales (como los vidrios de control solar o de baja emisividad) pueden reciclarse fácilmente, pudiéndose utilizar el casco de vidrio obtenido como materia prima para la fabricación de nuevo vidrio plano, sin que el producto final cambie sus propiedades o bien para la fabricación de otros productos, como las pinturas. No obstante, los actuales circuitos de recogida selectiva gestionados por Ecovidrio están dirigidos principalmente a envases de vidrio. Para otros tipos de vidrio, como los residuos de construcción (ventanas), vidrios de iluminación, etc., los canales de recogida son insuficientes para permitir un reciclado intensivo y eficaz, por lo que desde las Administraciones se debería impulsar el desarrollo de dichos canales para mejorar la tasa de uso de casco de vidrio reciclado (propio y/o comprado), que en el caso del vidrio plano se sitúa en el 20%.

### **3.3.El impacto del transporte**

---

El impacto de un material constructivo engloba el transporte para el suministro de sus materias primas desde su extracción hasta la planta de producción, el transporte desde la planta de producción al edificio, y el transporte desde el edificio hasta la disposición final. Si bien el impacto de los dos últimos no suele ser significativo, tal como ha quedado patente en el apartado 3.2, el transporte de las materias primas suele tener una contribución relevante en el impacto ambiental total del producto.

La siguiente figura muestra comparativamente las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes asociadas a 1 tonelada\*kilómetro (t\*km) en distintos medios de transporte según la base de datos *Ecoinvent*. La tonelada\*kilómetro es una unidad habitualmente utilizada en estos casos y se obtiene multiplicando el peso de las mercancías transportado (en t) por la distancia recorrida (en km). Como se puede comprobar, el transporte de mercancías marítimo es el que tiene un menor impacto, seguido del transporte por ferrocarril, siendo el transporte por carretera el de mayor impacto. Como es lógico, los transportes con mayor capacidad de carga conllevan unas menores emisiones por t\*km transportada. Un buque portacontenedores puede transportar hasta 125.000 t, -6.000 veces más que un camión- mientras que un vagón de carga puede transportar unas 45 t, -2 veces más que un camión-.

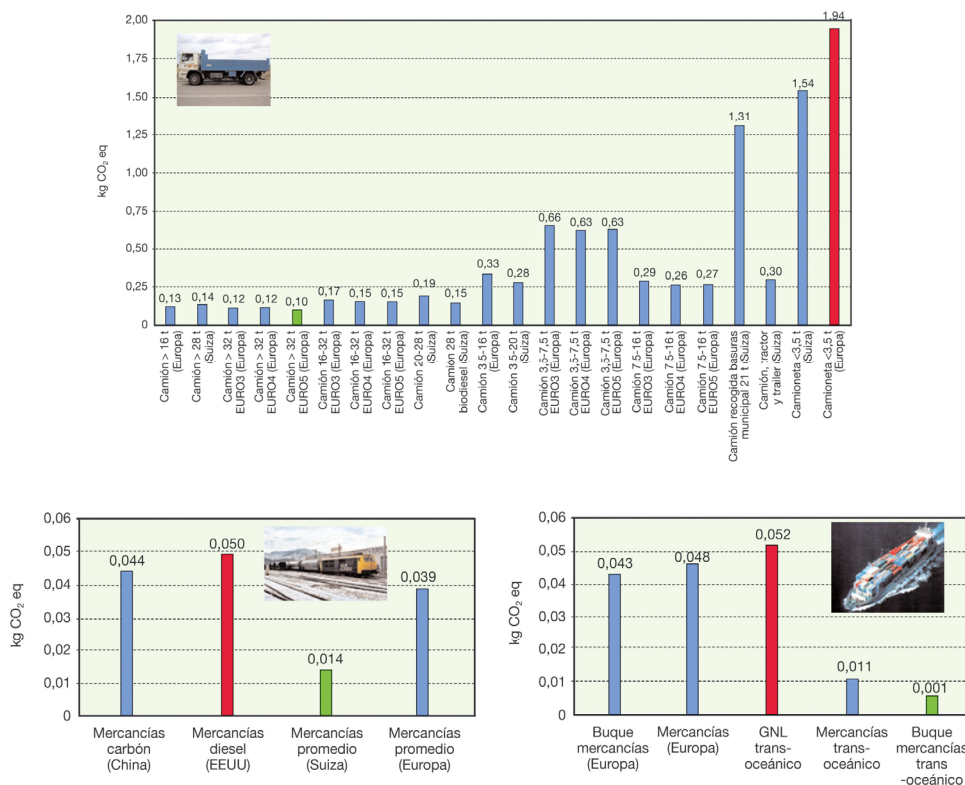


Figura 3.10. Evaluación del potencial de calentamiento global en emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes de 1 t\*km en distintos medios de transporte (terrestre – arriba, ferroviario – abajo izquierda, y marítimo – abajo derecha.)

La siguiente gráfica muestra la distribución de los impactos en energía incorporada y potencial de calentamiento global de 1 t\*km en los distintos medios de transporte, considerando el impacto del desplazamiento propiamente dicho, la fabricación y el mantenimiento de los medios utilizados (camión, locomotora y vagones y barco), así como la fabricación y mantenimiento de las infraestructuras asociadas (carreteras, vías ferroviarias y puertos marítimos). De nuevo, los mayores impactos se centran en el desplazamiento e infraestructuras asociadas al transporte terrestre.

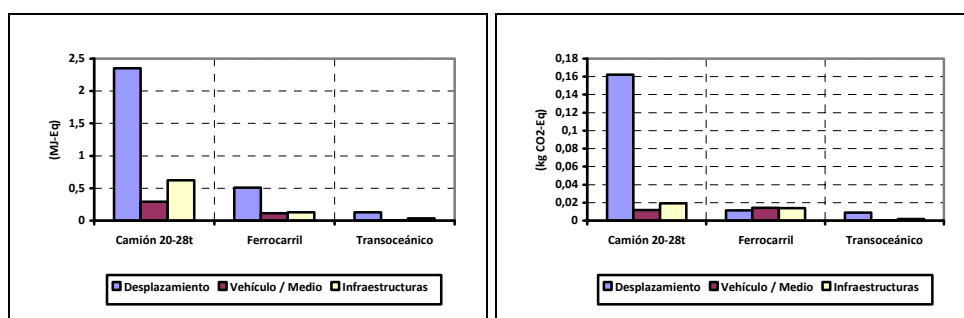


Figura 3.11. Distribución del impacto en energía incorporada (izqda.) y potencial de calentamiento global (dcha.) de 1 t\*km en distintos medios de transporte

Las siguientes figuras muestran para los distintos grupos de materiales analizados las necesidades de transporte de sus materias primas, desde su extracción hasta la planta de producción, expresadas en kg\*km. Como se puede comprobar hay que destacar la importancia del transporte marítimo de las materias primas, que además, prácticamente en su totalidad, es de carácter transoceánico, por lo que, a pesar de su menor impacto en kg\*km, al tratarse de distancias de varios miles de kilómetros, sus cargas medioambientales son importantes. Esta circunstancia es la responsable del alto impacto de materiales globalizados como el aluminio, el cobre y el acero. Asimismo debe considerarse el transporte por tubería de materias primas como el gas o el petróleo, que constituyen recursos no disponibles en buena parte de los países de Europa, pero sin embargo son ampliamente utilizados en la mayoría de los materiales de la construcción.

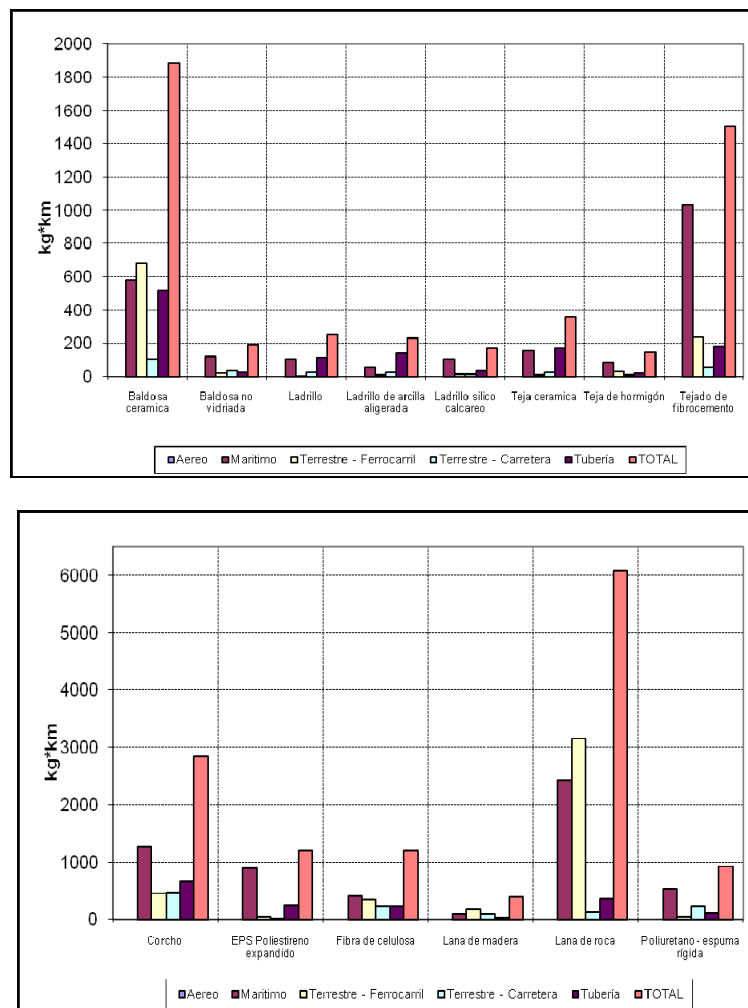


Figura 3.12. Transporte de las materias primas en la etapa de fabricación de ladrillos, baldosas y tejas (arriba) y aislamientos térmicos (abajo)



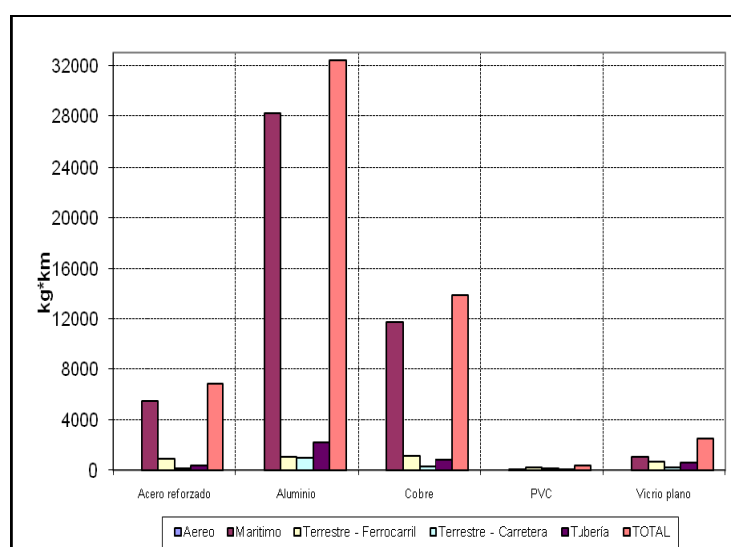
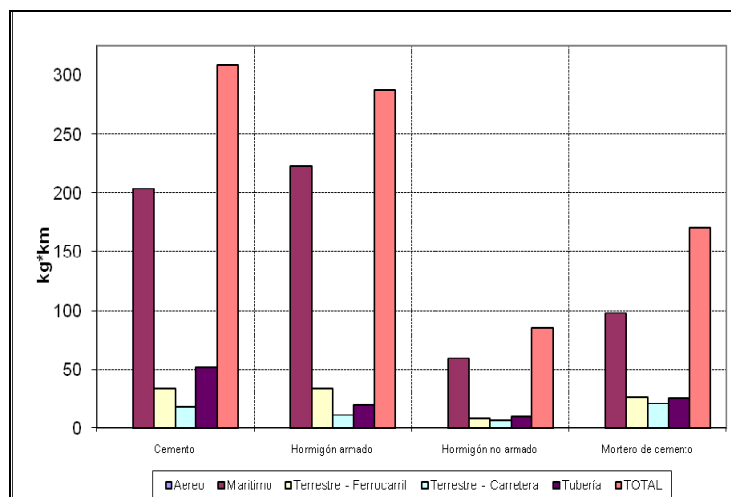


Figura 3.13. Transporte de las materias primas en la etapa de fabricación de cemento y hormigón(arriba) y materiales comunes (abajo)

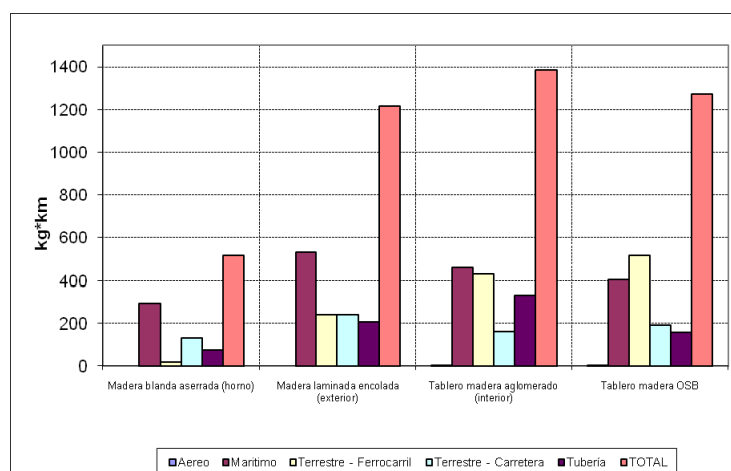


Figura 3.14. Transporte de las materias primas en la etapa de fabricación de maderas

En el apartado 3.2 se ha evaluado el impacto de la etapa de transporte de planta a obra en los distintos materiales considerando siempre un camión de 20-28 t, recorriendo una distancia promedio planta-obra de 100 km. A continuación se hace un análisis de sensibilidad para otros medios de transporte en función de la distancia recorrida. La Tabla 3.78 muestra los valores a aplicar para evaluar el impacto de 1 tonelada de producto transportado de planta a obra para distintos medios, a partir de la correlación lineal (Zabalza I., et al., 2009b):  $m_1*d_1 + m_2*d_2 + m_3*d_3$ ; donde  $d_i$  es la distancia recorrida en cada medio (en km) y  $m_i$  los coeficientes de impacto aplicados a cada medio. Nuevamente el transporte por carretera es el causante de los mayores impactos.

Categoría de impacto	Camión 20-28t Mercancías: $m_1$	Ferrocarril Mercancías: $m_2$	Mercancías Transoceánico: $m_3$
Energía incorporada total (MJ-Eq/km)	3,266	0,751	0,170
Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq/km)	0,193	0,039	0,011
Huella hídrica (l/km)	1,466	1,115	0,097
Puntuación única (mPt/km)	17,597	2,894	1,285

Tabla 3.78. Coeficientes para el cálculo del impacto de la etapa de transporte planta-obra  
Fuente: (Zabalza I., et al., 2009b)

Analizando comparativamente el impacto del transporte de las materias primas necesarias para la fabricación del producto y el impacto del transporte del producto de planta a obra se observa que éste último es mucho más reducido (en el apartado 3.2 se valoró para todos los materiales en 100 kg\*km). Por ello, se puede concluir que en una estrategia de minimización de las operaciones de transporte se debería priorizar el uso de materias primas en ámbitos locales frente a la existencia de plantas de producción en las inmediaciones de las construcciones de edificios.

Según la Encuesta Permanente de Transportes de Mercancías por Carretera, en 2008 el transporte de mercancías por carretera en España ascendió a 2.120 millones de toneladas/año y 243.000 millones de toneladas\*kilómetro/año con un parque de vehículos autorizados de 224.872 vehículos, de los que casi la mitad son vehículos rígidos de más de 10t, y casi la cuarta parte tienen más de 15 años de antigüedad. Del total de 290.733.910 operaciones/año realizadas, cabe destacar que el 46% de las mismas se realizó con el camión vacío (sin carga). En cuanto a la distribución del número de toneladas-kilómetro transportadas en función de la distancia recorrida, tal como muestra la siguiente figura, en España predomina el transporte interregional.

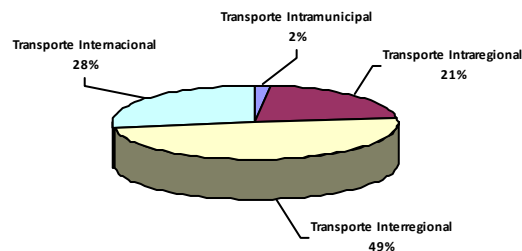


Figura 3.15. Distribución porcentual del número de toneladas-kilómetro por tipo de desplazamiento en carretera en España en 2008. (Fuente: Ministerio de Fomento, 2008)

El transporte de mercancías por carretera relacionadas con la construcción supone casi el 60% de las toneladas transportadas y el 20% del total de toneladas-kilómetro. Esta diferencia se debe a la menor repercusión de los materiales de construcción en el transporte internacional por carretera (Ministerio de Fomento, 2008). Con todo, el transporte de materiales de construcción supuso en España en el año 2008 un impacto global aproximado de 9.385 Mt CO<sub>2</sub>-Eq/año y de 158.708 TJ-Eq/año en energía primaria.

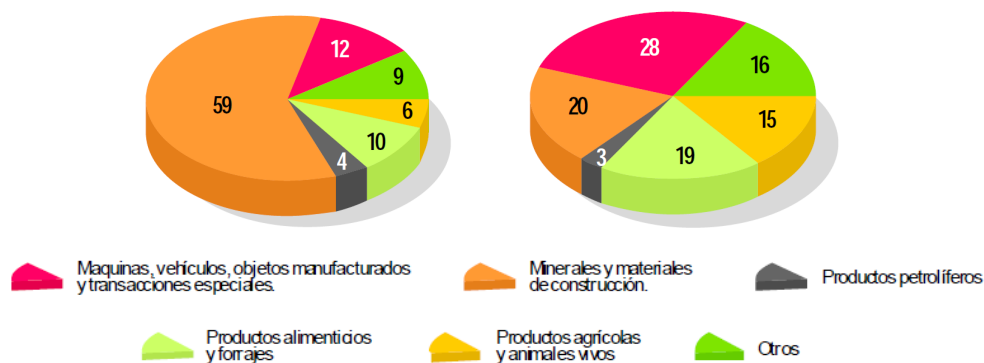


Figura 3.16. Distribución porcentual de toneladas transportadas (izqda.) y de toneladas-kilómetro (dcha.) por carretera según tipo de mercancía en España en 2008. (Fuente: Ministerio de Fomento, 2008)

En 2008, en España, la longitud de la red de carreteras era de 166.011 km. No obstante a la longitud anterior habría que sumar 489.698 km propiedad de los Ayuntamientos y 11.355 km de otros organismos, lo que supone un total de 667.064 km, que representa el 12% del total de la Unión Europea que asciende a 5.454.446 km (Ministerio de Fomento, 2008). Por tanto, en España hay unas ratios de 1,32 km de carretera por kilómetro cuadrado y 14,29 km de carretera por cada 1.000 habitantes. Estas cifras contrastan con las de otros países como Estados Unidos o Japón.

En Estados Unidos, país claramente estructurado según un modelo disperso, se disponía de un total de 6.465.799 km de carreteras en 2007, de los cuales el 65% estaba pavimentado. Ello conlleva unas ratios de 0,7 km de carretera por kilómetro cuadrado y 21,28 km de carretera por cada 1.000 habitantes. Por otra parte, en Japón, país densamente poblado con 337 hab/km<sup>2</sup>, la red de carreteras en 2006 era de 1.196.999 km, lo que supone unas ratios de 3,17 km de carretera por kilómetro cuadrado y 9,39 km de carretera por cada 1.000 habitantes.

El impacto por cada km de carretera, contabilizando su construcción, renovación (de la superficie cada 15 años y del forjado cada 40 años) y todo tipo de mantenimiento (iluminación nocturna, marcado de líneas, aplicación de sal en invierno, eliminación de maleza en los bordes, etc.), durante un período de 100 años, conlleva una energía incorporada de 78.625,7 GJ-Eq (el 90% de origen no-renovable), unas emisiones de 1.675,6 t CO<sub>2</sub>-Eq, una huella hídrica de 71.661 m<sup>3</sup> y una puntuación total de 206.261 Pt. Estas cifras, unidas a los más de 32 millones de km de carreteras existentes a nivel mundial, deberían hacer reflexionar a las Administraciones y organismos competentes sobre el alto impacto de las infraestructuras necesarias para el transporte de mercancías por carretera y la conveniencia de apostar por infraestructuras más compactas, menos globalizadas y más locales, así como adoptar otros medios de transporte de menor impacto.

La siguiente gráfica muestra la evolución creciente del transporte de mercancías en España durante los últimos años. En los últimos diez años, la cifra total de toneladas-kilómetro se ha multiplicado por tres, debido principalmente al aumento en el transporte por carretera, que además ha registrado un aumento en la flota de vehículos pesados autorizados del 16% en el periodo 2002-2008, aumentando el transporte marítimo y disminuyendo el transporte ferroviario.

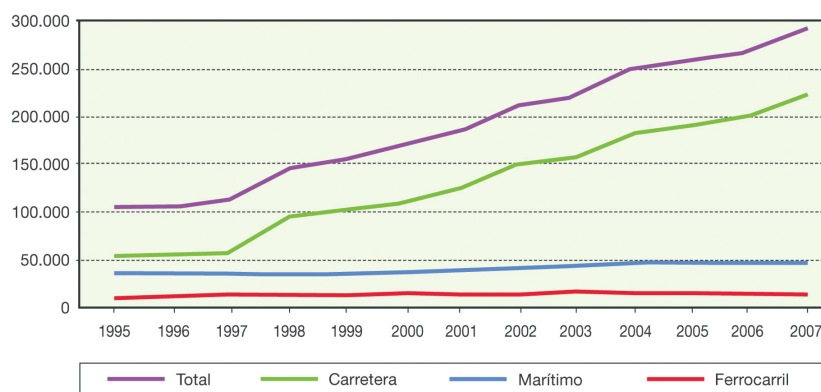


Figura 3.17. Evolución de la demanda de transporte en millones de t\*km en España (Fuente: Ministerio de Fomento)

En el período 1999-2008 el transporte de mercancías por ferrocarril ha sufrido un descenso del 17% pasando de 12.000 Mt\*km/año en 1999 a 10.000 Mt\*km/año en 2008. Llama la atención el poco uso de este medio de transporte en España, especialmente si se compara con la situación existente en otros países de nuestro entorno. Así en Alemania la cifra anual de Mt\*km es 10 veces superior a la de España, en Polonia es 5 veces mayor, en Francia 4 veces mayor, y en países como Austria, Italia o Reino Unido la cifra es aproximadamente el doble a la española (Ministerio de Fomento, 2008).

España es uno de los países europeos con un menor peso del transporte ferroviario de mercancías, que tan sólo representa el 4% del tráfico total de mercancías, cuando en la Unión Europea alcanza el 11%. Sin embargo, España ocupa la segunda posición en Europa en el transporte por carretera, sólo por detrás de Alemania. Además el transporte por carretera representa en España el 76% del tráfico total de mercancías, mientras que la media de la Unión se sitúa en el 46% (Ministerio de Fomento, 2008).

Con respecto al transporte de mercancías marítimo, España dispone actualmente de 46 puertos, habiendo experimentado, en el periodo 2000-07, un crecimiento del 28% pasando de 326 a 418 Mt/año, debido principalmente al transporte exterior, permaneciendo más o menos estable el cabotaje. Entre los productos transportados destaca el petróleo, que supone el 15% del peso total transportado y el carbón que supone un 8%. En España el transporte marítimo representa el 15,5% del tráfico total de mercancías, mientras que la media de la Unión Europea es del 37% (Ministerio de Fomento, 2008).



Figura 3.18. Principales corredores y red de terminales de tráfico ferroviario de mercancías en España (arriba) y sistema portuario (abajo) (Fuente: Ministerio de Fomento)

Respecto al transporte por tubería en España, durante el período 1990-2008 la red de oleoductos para el transporte de crudo y refinados ha aumentado un 19% pasando de 2.678 a 3.181 km, mientras que la red de gasoductos se ha duplicado al pasar de 4.195 a 8.134 km. Del mismo modo, el uso de estas infraestructuras se ha multiplicado por un ratio entre 2 y 3, pasando en el caso de los oleoductos de 4.125 a 9.141 Mt\*km/año, y en el caso de los gasoductos de 1.328 a 3.800 Mt\*km/año. El transporte por tubería en España representa el 4,4% del tráfico total de mercancías, ligeramente superior a la media de la Unión Europea que es del 3% (Ministerio de Fomento, 2008).

A partir de las cifras anteriores, se puede concluir que el sistema de transporte de mercancías en España, comparado con el de otros países europeos, presenta una deficiente intermodalidad con un reparto modal claramente desequilibrado hacia el transporte por carretera, que es el que además produce los mayores impactos medioambientales. Por ello, desde la Administración Central se debería diseñar un nuevo mapa logístico con diversos centros de intercambio modal en el que el transporte ferroviario de mercancías adquiera una mayor representatividad sustituyendo progresivamente al transporte por carretera.

A modo de ejemplo, si en España se pudiera sustituir completamente el 70% del transporte de mercancías por carretera relacionado con la construcción (interior e internacional, recibido y expedido) por transporte ferroviario, el ahorro en energía primaria sería de 23.300 GWh/año, evitando la emisión de 6.700 MtCO<sub>2</sub>/año, cifra 25 veces mayor a todo lo previsto en el Plan de Acción 2008-2012 de la E4. Evidentemente la sustitución total no es factible, pero sí se puede plantear el transporte ferroviario para trayectos medios-largos que terminen en centros de

intercambio modal distribuidos por el territorio, dejando el transporte por carretera únicamente para los trayectos cortos desde dichos centros hasta los puntos de destino final.

### **3.4. Conclusiones**

---

El sector de la construcción utiliza grandes cantidades de materias primas, que conllevan importantes niveles de consumo energético. La selección de materiales con alto contenido en energía incorporada implica un alto consumo inicial de energía en la fase de construcción y además determina el futuro consumo de energía para satisfacer las demandas de calefacción, ventilación y refrigeración.

La reducción del impacto medioambiental de los edificios conlleva el uso de materiales renovables o reciclados de la biosfera, como la madera, las fibras animales o vegetales, las pinturas y barnices naturales, con bajo nivel de procesamiento industrial. En estos casos, la mayoría de la energía asociada a su producción proviene del sol, por lo que el consumo de energías no-renovables y las emisiones asociadas se reducen considerablemente.

Los resultados de este capítulo deben ser considerados como una aproximación a los impactos ambientales reales de los materiales de construcción evaluados. Estos impactos, obviamente, puede variar dependiendo del nivel de adaptación de los inventarios a cada zona geográfica o tecnología específica. Además, tal como se ha puesto de manifiesto, una base de datos con el prestigio y reconocimiento de *Ecoinvent*, basa sus inventarios de algunos productos sobre estudios realizados en tan solo 1 ó 2 plantas, que si bien pueden considerarse más o menos representativas no pueden abarcar todas las posibles tecnologías aplicables.

Por ello, se puede concluir que es importante ampliar, adaptar y armonizar las bases de datos de inventario existentes para los materiales de construcción a las características y especificidades de las industrias de la construcción en cada país. Para facilitar esta tarea, desde las Administraciones Públicas se debería estimular la realización por parte de los fabricantes de materiales, de Declaraciones Medioambientales de Producto –DAP- (o ecoetiquetas tipo III definidas según nomenclatura ISO), verificadas por entidades independientes, que ofrecieran información estándar basada en ACV de los impactos reales de cada producto. De este modo se estimularía la competitividad entre los fabricantes de materiales para lanzar al mercado productos más ecoeficientes, que serían mejor valorados por el sector de la construcción frente a otros productos sin DAP, ya que permitiría ofrecer una nueva gama de edificios que sean realmente de bajo impacto ambiental, no solo por su bajo consumo de energía final, sino también por el reducido impacto de los materiales que lo componen. En este sentido, se dispondría de información precisa de los impactos de cada producto que facilitaría la correcta evaluación de los impactos de un edificio desde la perspectiva del ACV. Sin dicha información, estos impactos solo pueden estimarse de forma aproximada a partir de inventarios existentes, que en ocasiones, tal como se ha demostrado para la lana de oveja o el cemento, son difícilmente adaptables a la realidad de una zona geográfica concreta.

A modo de ejemplo, en Francia, para que un edificio pueda obtener la certificación de alta calidad ambiental “HQE”, los materiales y productos empleados deben tener su DAP, lo que favorece el desarrollo de DAP por parte de las empresas. Además, conviene remarcar que las principales empresas del sector de la construcción se ven afectadas por el Protocolo de Kyoto, y muchas otras forman parte de los sectores identificados como difusos. Por ello, la mayoría de estas

empresas tienen contabilizadas las entradas y salidas asociadas a su proceso productivo y sin embargo no han desarrollado la DAP de su producto debido a la inversión necesaria para que su desarrollo se haga en base a la normativa, siga las Reglas de Categoría de Producto, sea verificada y se adapte a un sistema de ecoetiquetado específico.

En cualquier caso, los resultados obtenidos en este capítulo muestran tendencias claras en cuanto al impacto que puede suponer el uso de los distintos materiales de construcción.

Como ha quedado demostrado, al analizar los distintos tipos de ladrillos, baldosas y tejas, las baldosas cerámicas son las que tienen una mayor energía incorporada y puntuación total, debido principalmente al elevado consumo de gas natural en su etapa de fabricación. De hecho, la etapa de cocción en el horno puede llegar a suponer hasta el 80% del consumo total en la planta de producción. Además, la demanda de agua en las baldosas cerámicas -principalmente evaporada en procesos de enfriamiento- es 7,5 veces mayor que la de las tejas y ladrillos cerámicos.

Por otra parte, se ha demostrado que la elaboración de baldosas cerámicas a partir de arcillas de pasta blanca, cada vez más utilizadas y que hay que importar de países lejanos, en vez de aprovechar la tradicional arcilla de pasta roja disponible en provincias como Castellón y Teruel, supone multiplicar la energía incorporada y las emisiones por un factor de 1,6, por lo que convendría incentivar entre los fabricantes el retorno a la pasta roja, que en revestimientos interiores ofrece similares cualidades. Con ello se podrían llegar a ahorrar a nivel nacional más de 5.000 GWh-Eq/año.

En pavimentos exteriores, el uso de baldosas de hormigón en detrimento de las baldosas cerámicas es recomendable, obteniendo un ahorro en energía primaria de 534 MJ-Eq/m<sup>2</sup> y una disminución de emisiones de 22 kg CO<sub>2</sub>-Eq/m<sup>2</sup>.

Por otra parte, los elevados impactos asociados al fibrocemento hacen que sea la peor opción de cara a su uso en tejados, siendo, en general, preferible la teja de hormigón frente a la teja cerámica. De este modo, la teja cerámica produce un ahorro de 24 MJ-Eq/m<sup>2</sup> frente al tejado de fibrocemento, y a su vez, la teja de hormigón permite ahorrar hasta 70 MJ-Eq/m<sup>2</sup> frente a la teja cerámica.

Respecto a los ladrillos, el uso de ladrillos de arcilla aligerada (compuestos por un 85% de arcilla y un 15% paja) o silico-calcáreos (elaborados con un 90% de cal y un 10% de arena) conlleva una clara disminución de los impactos. Aunque en los ladrillos de arcilla aligerada, la energía incorporada es relativamente alta, hay que destacar que el 45% de dicha energía es de origen biomásico, debido al contenido de paja incorporada. Además los ladrillos de arcilla aligerada tienen un balance de CO<sub>2</sub> prácticamente neutro, por lo que su uso en detrimento de los ladrillos convencionales evita la emisión de 0,27 kg CO<sub>2</sub>/kg.

Conviene destacar el potencial de disminución de impactos existente en los productos cerámicos asociado a las mejoras tecnológicas en su fabricación, como por ejemplo, la sustitución de hornos antiguos de operación discontinua por hornos túnel con un aumento de la eficiencia energética del 20%, el uso de quemadores de alta velocidad y la recuperación del calor de los humos de los hornos para precalentar/secar el producto a cocer consiguiendo una reducción en el consumo del horno del 5% y el 8% respectivamente, y la instalación de sistemas de cogeneración con una reducción del 10% de la energía primaria.

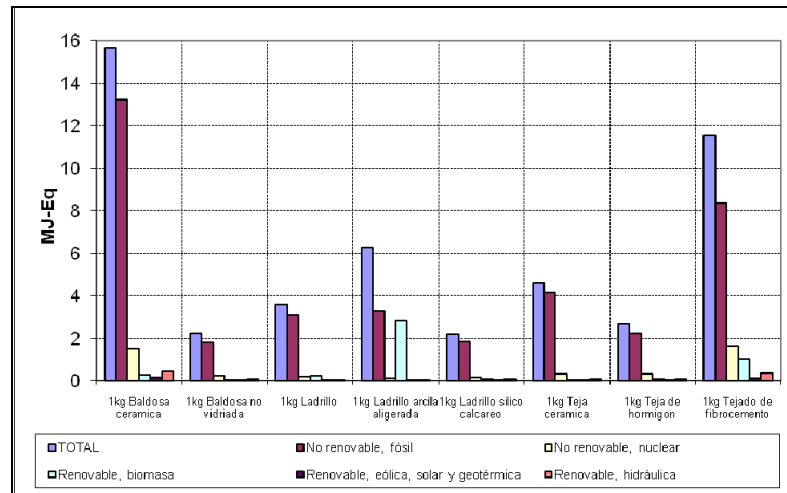


Figura 3.19. Evaluación del impacto del ciclo de vida en energía incorporada de ladrillos, baldosas y tejas

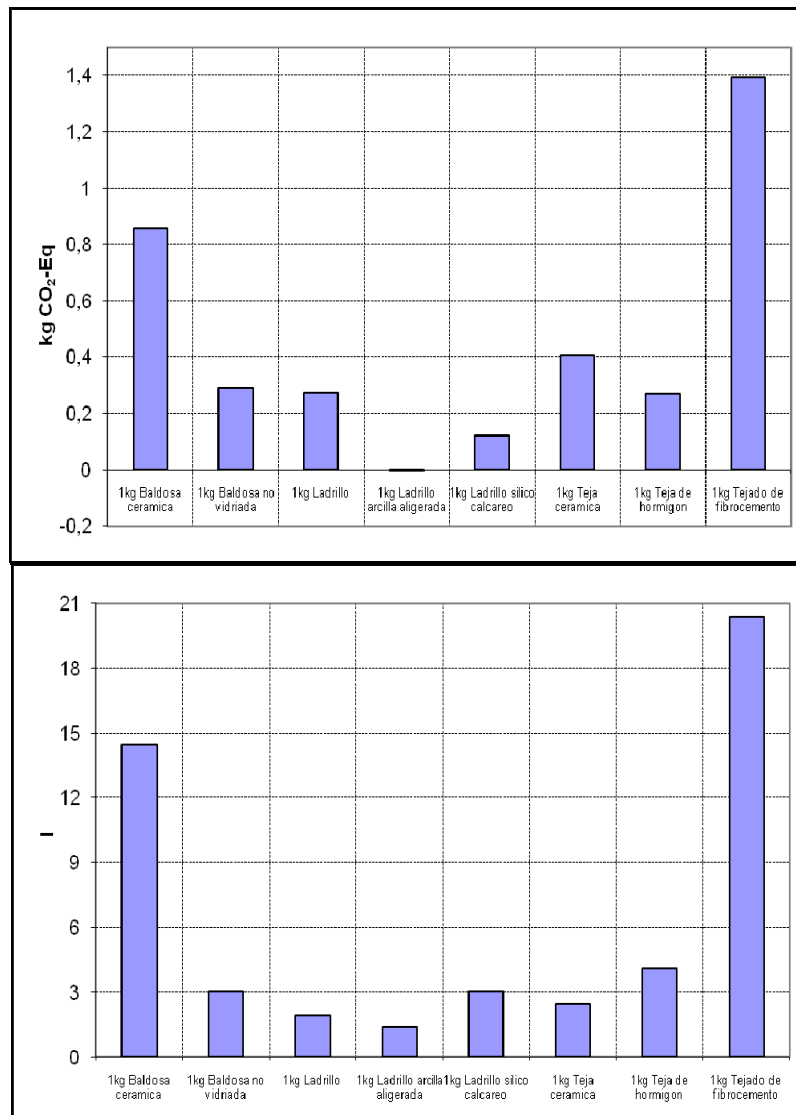


Figura 3.20. Evaluación del impacto del ciclo de vida en potencial de calentamiento global (arriba) y huella hídrica (abajo) de ladrillos, baldosas y tejas



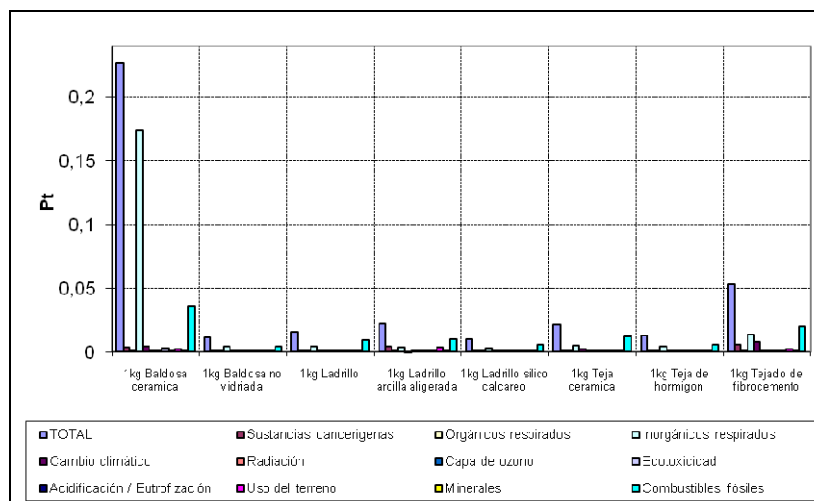


Figura 3.21. Evaluación del impacto del ciclo de vida en puntuación única de ladrillos, baldosas y tejas

En cuanto a los aislamientos se ha demostrado que el impacto de los aislantes convencionales con alto nivel de procesamiento industrial -como el EPS- es claramente superior al impacto de materiales naturales como el corcho, la fibra de madera y la lana de oveja, o reciclados como la fibra de celulosa. De este modo, mientras los aislantes como el EPS o el poliuretano emiten por término medio 7 kg CO<sub>2</sub>-Eq/kg con altos consumos altos de gas y petróleo, los aislantes de origen natural, como la lana de madera, emiten un 98% menos en caso de que su disposición final sea la incineración, pudiendo incluso llegar a convertirse en sumideros de dióxido de carbono en caso de que fueran reciclados al final de su vida útil. Para ello es fundamental promover un cambio radical en el diseño arquitectónico-estructural de los edificios que facilite su desensamblaje.

Debido al uso cada vez más extendido de los tejidos sintéticos, la lana de oveja se ha convertido para la sociedad actual, en un producto con un mercado cada vez más reducido, considerándose ya, en muchos casos, un “residuo” de difícil aprovechamiento. La creación de empresas productoras de lana de oveja como aislamiento térmico de los edificios permitiría convertir este “residuo” de nuestra época en una materia prima barata y abundante, que además contribuiría a un desarrollo sostenible y equilibrado de las áreas rurales.

Por otra parte, la obtención de corcho en los bosques y dehesas del Sur de Europa es una de las producciones más ecológicas que existen, ya que el corcho se extrae del árbol durante el verano cada 10 años. Con ello no se daña el árbol y se mantiene vivo un ecosistema de alto valor ecológico, que probablemente desaparecería por la roturación de tierras, en ausencia de aprovechamiento económico. A pesar de que la energía incorporada en las losas de corcho es ligeramente elevada, hay que remarcar que más del 50% es de origen biomásico, por lo que, en realidad, dicho impacto es muy bajo.

Los mayores impactos en los aislantes analizados se dan en las losas de poliestireno expandido y la espuma rígida de poliuretano. Ambas presentan la mayor huella hídrica –principalmente agua evaporada en procesos de refrigeración– así como la mayor energía incorporada y puntuación única, debido a la demanda de sustancias como el gas natural y petróleo para los distintos procesos de manufactura. Dichos procesos, junto con la disposición final de los productos en

incineradoras municipales conllevan también el mayor impacto en términos de potencial de calentamiento global. En comparación con estos aislantes, el impacto de la lana de roca presenta una energía incorporada 4 veces menor, una huella de carbono 4,7 veces menor, y una huella hídrica 8,4 veces más reducida. No obstante la lana de roca requiere un cierto consumo de carbón para la fusión de la roca basáltica y el uso de resinas fenólicas de alto impacto específico, por lo que, en modo alguno puede considerarse como un aislante natural.

En la actualidad, existe una cierta inercia al uso de los aislantes convencionales, debido a la existencia de una red comercial más extendida y que, por tanto, conlleva un precio normalmente más bajo, unida al desconocimiento y, a veces, el escepticismo existente entre algunos diseñadores por otras soluciones más respetuosas con el medio ambiente. Para cambiar esta situación se debería fomentar desde las distintas Administraciones el uso de materiales aislantes naturales y/o reciclados, que proporcionan un nivel de aislamiento y confort térmico en los edificios similar o incluso mayor, promoviendo la creación de una red comercial potente de aislantes ecológicos capaz de competir en igualdad de condiciones con los aislantes tradicionales. Conviene remarcar que la sustitución total de los aislamientos convencionales por aislamientos de origen biomásico, podría llegar a evitar la emisión de hasta 4,8Mt CO<sub>2</sub>-Eq/año.

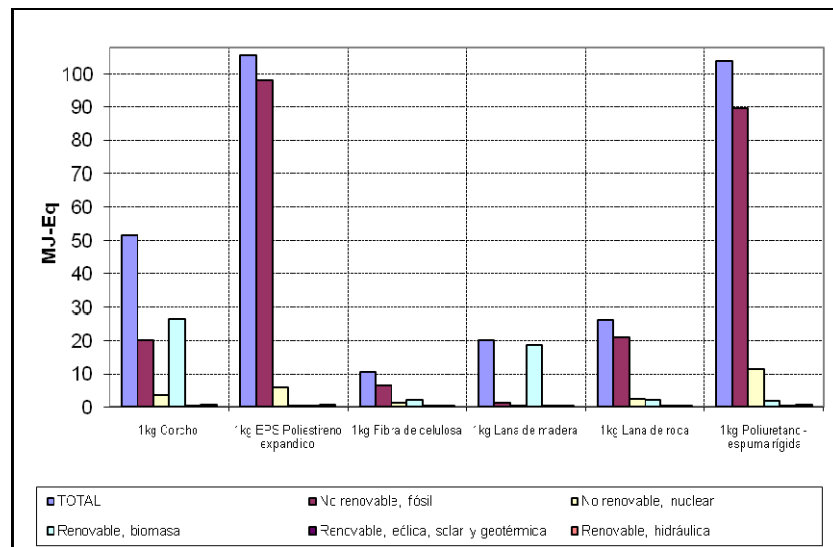


Figura 3.22. Evaluación del impacto del ciclo de vida en energía incorporada de aislamientos térmicos

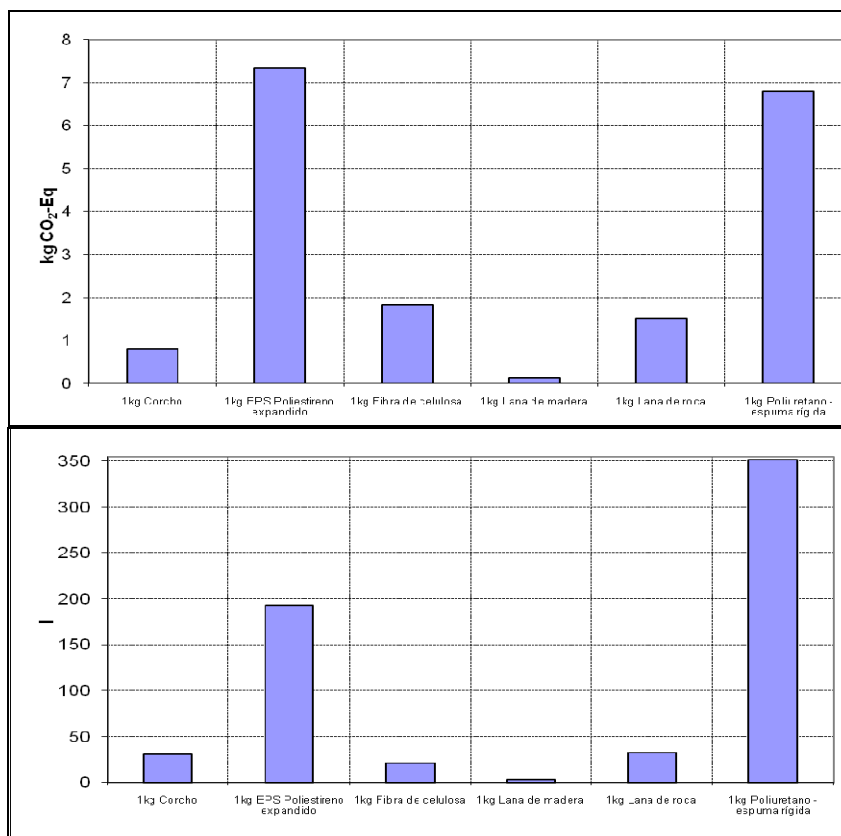


Figura 3.23. Evaluación del impacto del ciclo de vida en potencial de calentamiento global (arriba) y huella hídrica (abajo) de aislamientos térmicos

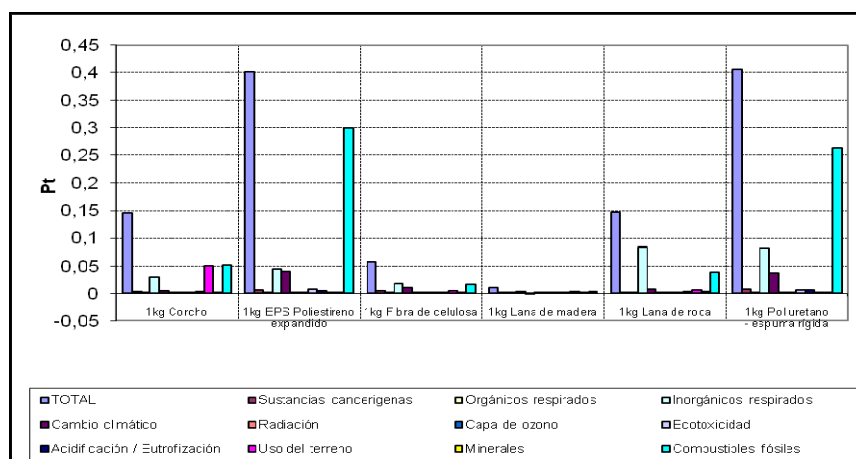


Figura 3.24. Evaluación del impacto del ciclo de vida en puntuación única de aislamientos térmicos

La industria del cemento en España, debería apostar claramente por la sustitución de materiales convencionales y combustibles fósiles por materiales y combustibles alternativos para el proceso de fabricación del clínker. Tal como se ha demostrado la influencia del proceso de fabricación del clínker en el ciclo de vida de todos los productos que utilicen cemento es muy significativa, por lo que si se pretende disminuir los impactos de dichos productos es esencial conseguir una producción más ecoeficiente del clínker, que actúa como materia prima en todos ellos.

Si bien en la mayor parte de los países europeos, el porcentaje de uso de combustibles alternativos en la fabricación de clínker se sitúa por encima del 35% - llegando incluso hasta un 80% en el caso de Holanda- en España este porcentaje se queda en un exiguo 4,2%, presentando grandes diferencias entre las distintas Comunidades Autónomas. Mientras en Murcia se acerca al 30%, en regiones como Aragón y Castilla-León se queda en un 1,9% y un 0,8% respectivamente.

El uso de combustibles alternativos en la industria cementera supone una valorización energética de distintos tipos de residuos, que de otra forma acabarían en un vertedero o incineradora, ocasionando unos impactos medioambientales más elevados. Esta valorización permite convertir residuos en recursos, contribuyendo a cerrar el ciclo de los materiales, concepto clave para alcanzar una verdadera ecología industrial.

Para conseguir este objetivo se debe favorecer el uso de combustibles alternativos en las plantas cementeras desde todas las Administraciones Públicas, creando un marco legislativo adecuado. Con ello, a nivel nacional, se podrían llegar a reducir las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> del sector hasta un 30%, con una inversión entre 1 y 5 M€ por planta cementera.

Además, la aplicación de diversas medidas de mejora tecnológica en las plantas de fabricación de clínker, tales como el mejor aprovechamiento de los calores residuales del horno, la disminución de la temperatura de clinkerización, y la implantación a medio plazo de la tecnología de lecho fluido, podría llegar a suponer, a nivel nacional, un ahorro potencial en energía primaria de hasta 8.000 GWh-Eq/año.

Asimismo comparando los consumos energéticos actuales de los hornos de clínker con los consumos energéticos teóricos, a través de una mejora tecnológica continuada las emisiones de CO<sub>2</sub> del cemento podrían reducirse en 2050 por un factor de 2 respecto a los niveles de 1990.

En las siguientes gráficas se comparan los principales productos elaborados a partir del cemento, considerando el inventario suizo, que tal como se ha demostrado puede resultar válido para algunas plantas cementeras españolas.

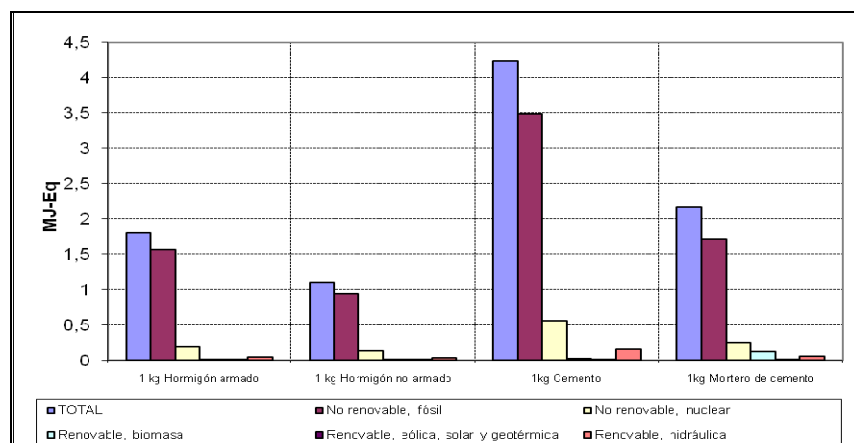


Figura 3.25. Evaluación del impacto del ciclo de vida en energía incorporada de cemento y hormigón

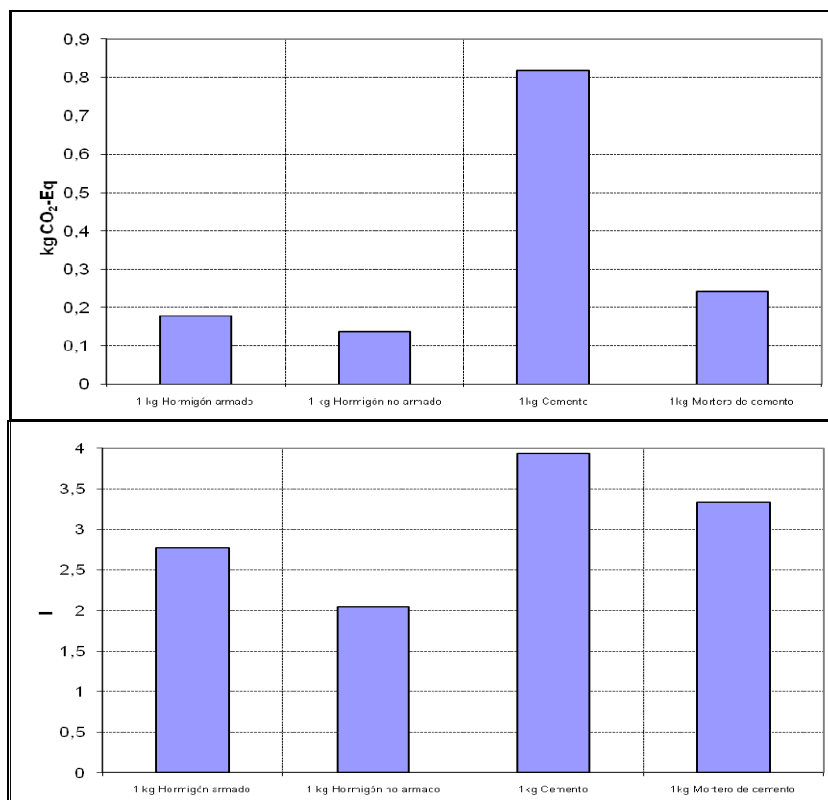


Figura 3.26. Evaluación del impacto del ciclo de vida en potencial de calentamiento global (arriba) y huella hídrica (abajo) de cemento y hormigón

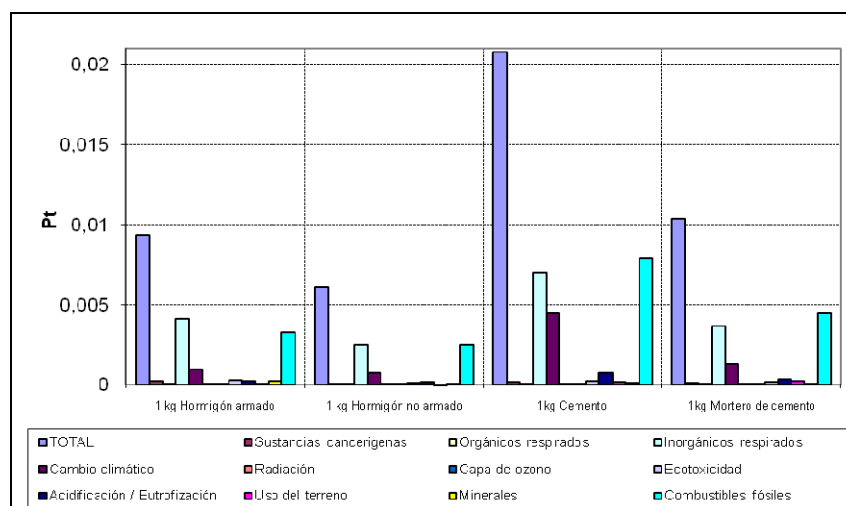


Figura 3.27. Evaluación del impacto del ciclo de vida en puntuación única de cemento y hormigón

En todos los casos, los impactos del cemento (constituido por clínker, yeso y caliza), condicionados principalmente por la fabricación del clínker, son superiores a los del mortero de cemento (constituido por cemento y arena), y a los del hormigón (constituido por cemento, grava y agua), ya que la mezcla del cemento con materiales de menor impacto como la grava, la arena o el agua contribuye a disminuir el impacto.

Conviene señalar que, si bien el impacto expresado por kilogramo no presenta cifras excesivamente elevadas, al cambiar la unidad funcional y expresar el impacto por metro cúbico de material, debido a la alta densidad de todos estos productos, los impactos son elevados. Además hay que considerar que estos productos suponen típicamente el 40-60% del peso total de un edificio convencional, con lo que condicionan fuertemente su impacto medioambiental, tal como se expondrá detalladamente en los capítulos 4 y 5.

Los impactos del hormigón armado son muy superiores a los del hormigón en masa, debido a la incorporación del acero corrugado que incrementa notablemente los impactos. De este modo, el incremento en la energía primaria incorporada es de 700 MJ-Eq/t, aumentando también las emisiones en 42 kg/t. Por todo ello, se puede concluir que los arquitectos deberían intentar ajustar todo lo posible la cantidad de acero empleada a las especificaciones técnicas requeridas en cada construcción, sin que ello suponga una disminución en la seguridad estructural.

Por otra parte, hay que destacar el interés de utilizar morteros de cal en sustitución de los morteros de cemento, ya que facilitan la transpiración de los edificios y absorben una cantidad apreciable de CO<sub>2</sub> durante el proceso de fraguado, que puede suponer hasta el 62% de las emisiones de los procesos de descarbonatación y combustión, a diferencia de los morteros de cemento o del hormigón, donde dicha absorción es inferior al 2%.

Por lo general, todos los materiales de construcción basados en la madera presentan unos impactos reducidos, más cuanto menos procesado industrial requiera cada producto concreto. La energía incorporada en todos estos productos es fundamentalmente biomásica, representando el 69-83% de la energía incorporada total. El balance en emisiones equivalentes de dióxido de carbono es casi neutro, debido al bajo procesado industrial y sería negativo (absorción neta de emisiones) en caso de que el fin de vida del producto fuese su reciclado o reutilización en vez de la incineración. Hay que considerar que cada m<sup>3</sup> de madera laminada (no incinerada al final de su vida útil) absorbe 582 kg CO<sub>2</sub>, mientras que el hormigón armado emite 458 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> y el acero 12.087 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.

Por todo ello sería recomendable la modificación del actual marco normativo edificatorio con objeto de promover el diseño de edificios con estructura de madera en detrimento de las estructuras convencionales a base de hormigón armado, ya que además de las claras ventajas medioambientales, las estructuras de madera ofrecen una mejor resistencia en caso de incendios.

En el contexto actual donde se está promoviendo e invirtiendo grandes cantidades de dinero en la captura y confinamiento del CO<sub>2</sub> en las plantas termoeléctricas, debe considerarse que el uso de madera estructural en los edificios conlleva, siempre que los procesos de tala sean sostenibles (lo que conlleva la plantación de un árbol nuevo por cada árbol talado), una captura previa de CO<sub>2</sub> en los bosques y un almacenamiento de dicho CO<sub>2</sub> durante toda la vida útil del edificio (50 años como mínimo), que además puede extenderse en caso de reutilización de la madera al final de la vida útil. Esto convierte a los edificios con estructura de madera en auténticos “almacenes de CO<sub>2</sub>” que, deberían ser promovidos desde las Administraciones.

A pesar de los bajos impactos, estos productos presentan un cierto potencial de mejora, relacionado sobretudo con la sustitución de las resinas convencionales de urea-formaldehído y melamina-formaldehído por resinas naturales, que ofrezcan

las mismas especificaciones técnicas en el producto final. En este sentido, se podría abrir una línea de investigación en la que empresas y centros de I+D trabajen conjuntamente hasta obtener unos productos neutros con el medioambiente.

Con ello, y dependiendo de la cantidad de resina utilizada en cada producto, se reducirían aún más las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub>. Por término medio, esta reducción se estima en un 16% para la madera laminada y en un 46% para el tablero aglomerado. Además, la obtención de resinas naturales es uno de los oficios tradicionales que en muchas zonas se está extinguiendo. El empleo de nuevas técnicas de explotación resinera para su uso en los distintos productos de la madera, redundaría en una creación de empleo y de riqueza en las áreas rurales.

Por otra parte, en las climatologías y períodos adecuados, el secado al aire libre de la madera aserrada -hasta niveles de humedad del 20-25%- en detrimento de su secado en horno permitiría reducir las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> en un 11%, sin más precaución que aumentar el stock de madera a fin de garantizar los suministros.

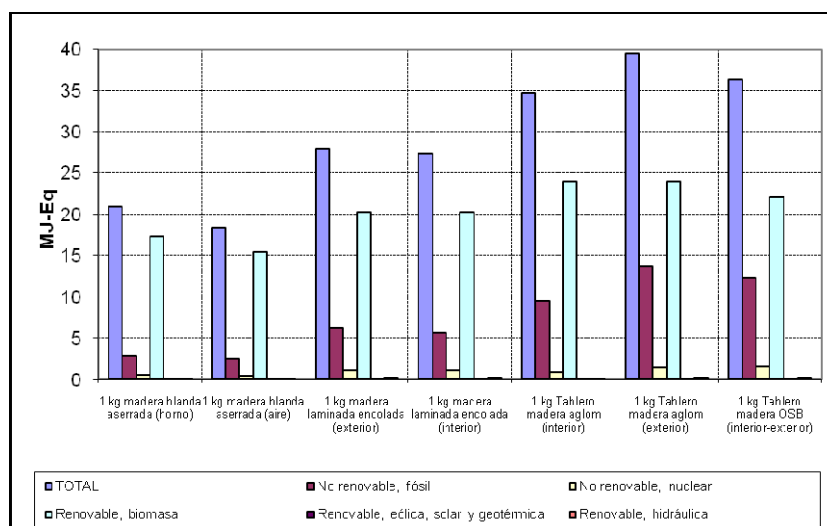


Figura 3.28. Evaluación del impacto del ciclo de vida en energía incorporada de maderas

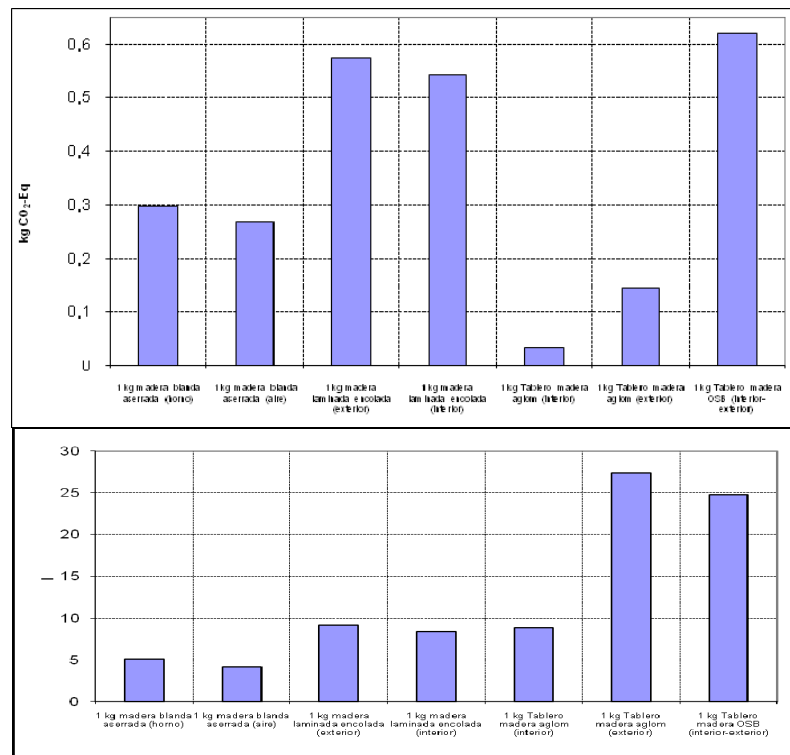


Figura 3.29. Evaluación del impacto del ciclo de vida en potencial de calentamiento global (arriba) y huella hídrica (abajo) de maderas

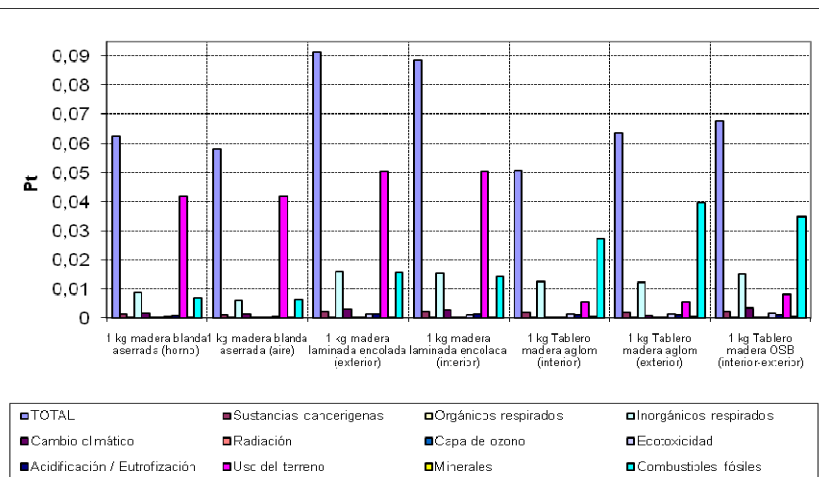


Figura 3.30. Evaluación del impacto del ciclo de vida en puntuación única de maderas

Tal como se ha expuesto en este capítulo, existen un buen número de materiales muy utilizados actualmente en la construcción de edificios, tales como el acero, el aluminio, el cobre, el PVC o el vidrio, que conllevan importantes cargas medioambientales, ocasionadas por el elevado consumo energético y de materias primas en los numerosos procesos productivos que componen su ciclo de vida. Además, en todos los casos, se trata de productos realizados en industrias totalmente globalizadas, lo que multiplica los impactos asociados al transporte.



De este modo, las necesidades de transporte, en el caso del aluminio ascienden a 32.000 kg\*km, a 13.800 kg\*km en el caso del cobre, a 6.800 kg\*km en el caso del acero y a 2.500 kg\*km en el vidrio.

De todos ellos, habría que destacar el aluminio, cuyo proceso productivo conlleva una gran demanda de energía, sobretodo electricidad, lo que eleva notablemente su impacto en energía incorporada y potencial de calentamiento global. Asimismo conviene destacar la importante huella hídrica asociada a la evaporación de agua en los distintos procesos de enfriamiento necesarios para la producción de PVC, y la elevada puntuación única del cobre, debida tanto al impacto de los procesos productivos como al agotamiento que provoca en las reservas de mineral de cobre.

La disminución de impactos en los metales analizados pasa por el aumento de la producción de la industria secundaria del acero, aluminio y cobre en detrimento de la industria primaria. Esta industria contribuye al agotamiento de las reservas de hierro, bauxita y cobre y al progresivo aumento de los costes energéticos de extracción, abarcando procesos de alto impacto como la electrolisis y la pirometalurgia.

Por ello, se deberían establecer acuerdos a nivel internacional para limitar las extracciones minerales y establecer incentivos al desarrollo de la industria secundaria de estos productos, que contribuiría a aumentar su reciclaje, favoreciendo la transformación de residuos en recursos que contribuyen a preservar las reservas minerales del planeta. De este modo, cada kilogramo producido de acero secundario evita la emisión de 1,2 kg CO<sub>2</sub>-Eq respecto a la misma cantidad producida de acero primario. En el caso del cobre secundario, la disminución es de 1,7 kg CO<sub>2</sub>-Eq/kg, llegando a alcanzar los 11,3 kg CO<sub>2</sub>-Eq/kg evitados en el caso del aluminio secundario.

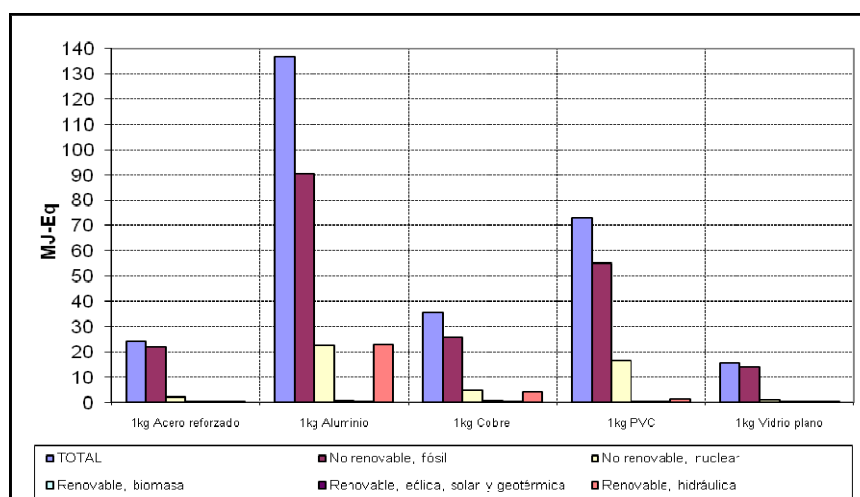


Figura 3.31. Evaluación del impacto del ciclo de vida en energía incorporada de diversos materiales comunes

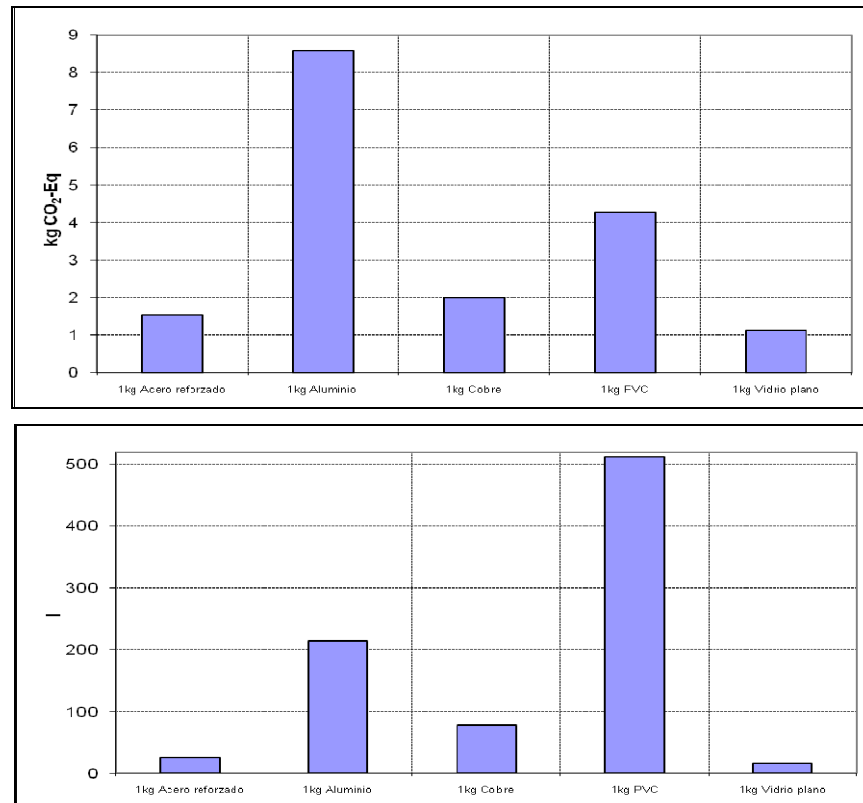


Figura 3.32. Evaluación del impacto del ciclo de vida en potencial de calentamiento global (arriba) y huella hídrica (abajo) de diversos materiales comunes

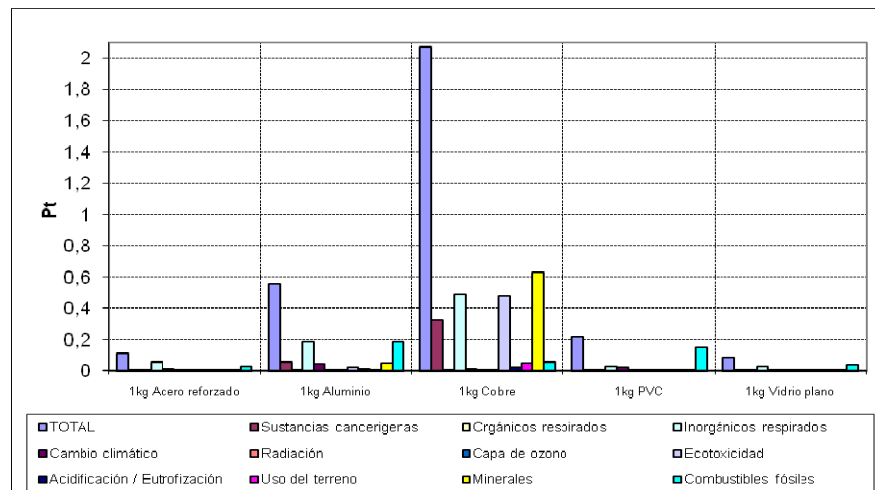


Figura 3.33. Evaluación del impacto del ciclo de vida en puntuación única de diversos materiales comunes

Una vez analizados individualmente los distintos grupos de materiales conviene hacer una reflexión conjunta sobre todos ellos. La siguiente tabla muestra el ranking de materiales ordenados por su contribución al potencial de calentamiento global, seleccionado como indicador representativo de su impacto.

Nº	Material	Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq/kg)	Nº	Material	Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq/m <sup>3</sup> )
1	Lana de madera	-1,58	1	Tablero de madera aglomerado	-906
2	Tablero de madera aglomerado	-1,51	2	Madera blanda aserrada	-702
3	Madera blanda aserrada	-1,17	3	Madera laminada	-582
4	Madera laminada	-0,97	4	Tablero OSB	-558
5	Tablero OSB	-0,93	5	Lana de madera	-284,4
6	Corcho	-0,67	6	Corcho	-100,5
7	Ladrillo arcilla aligerada	-0,004	7	Ladrillo arcilla aligerada	-4,08
8	Ladrillo silico-calcáreo	0,12	8	Fibra de celulosa reciclada	17
9	Hormigón no armado	0,14	9	Lana de roca	90,6
10	Hormigón armado	0,18	10	Ladrillo silico-calcáreo	183,6
11	Mortero de cemento	0,24	11	Espuma rígida de poliuretano	203,7
12	Ladrillo	0,27	12	EPS Poliestireno expandido	220,2
13	Teja de hormigón	0,27	13	Hormigón no armado	333,2
14	Baldosa de hormigón	0,29	14	Mortero de cemento	366
15	Fibra de celulosa reciclada	0,34	15	Hormigón armado	458,28
16	Teja cerámica	0,41	16	Ladrillo	486
17	Cemento	0,82	17	Baldosa de hormigón	609
18	Baldosa cerámica	0,86	18	Teja de hormigón	642,6
19	Vidrio plano	1,14	19	Teja cerámica	820
20	Tejado de fibrocemento	1,39	20	Baldosa cerámica	1.720
21	Lana de roca	1,51	21	Tejado de fibrocemento	2.502
22	Acero	1,53	22	Cemento	2.583
23	Cobre	2	23	Vidrio plano	2.850
24	PVC	4,27	24	PVC	5.978
25	Espuma rígida de poliuretano	6,79	25	Acero	12.087
26	EPS Poliestireno expandido	7,34	26	Cobre	17.840
27	Aluminio	8,57	27	Aluminio	23.139

Tabla 3.79. Potencial de calentamiento global en los materiales analizados por unidad de peso (izqda.) y por unidad de volumen (dcha.)

Tal como ha quedado demostrado, los productos de madera así como los aislantes naturales son sumideros de CO<sub>2</sub> en caso de no ser incinerados al final de su vida útil, y por tanto son los materiales más recomendables, mientras que en el extremo opuesto estarían los materiales metálicos. Como se puede observar en la Tabla 3.79 existen algunas diferencias en función de si el impacto se evalúa por unidad de peso o de volumen, debido a las diferencias de densidad existentes entre los materiales. Esto corrobora el hecho de que a menor densidad y mayor ligereza, el impacto tiende a disminuir.

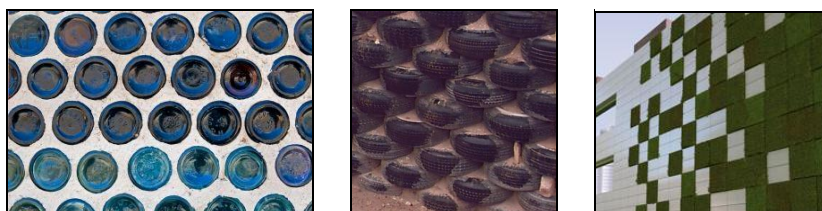
Otra forma de comparar el impacto de los distintos materiales es analizar una solución constructiva que los agregue. A modo de ejemplo, si se considera un muro exterior típico con una transmisividad de 0,55 W/m<sup>2</sup>K, formado por ladrillo macizo, mortero de cemento, EPS (5 cm), ladrillo hueco y enlucido de yeso; se observa que el 90% del peso corresponde al ladrillo (el 70% al ladrillo macizo y el 20% al ladrillo ligero), y consecuentemente el 82% del impacto del muro en energía y CO<sub>2</sub> se debe a este material, obteniendo un impacto total de 90 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> de muro. En cambio, si se optase por un muro exterior con similar transmisividad, pero compuesto por mortero de cemento, bloque cerámico de arcilla aligerada, lana de madera (8 cm) y yeso, el impacto se puede llegar a reducir a tan solo 3 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> de muro.

Por otra parte, en un forjado interno típico con una transmisividad de 0,8 W/m<sup>2</sup>K, compuesto por baldosas cerámicas, mortero de cemento, EPS (3 cm), entrevigado de hormigón armado y yeso; el 80% del peso de debe al hormigón y el 10% a las baldosas; obteniendo que el 55% del impacto en CO<sub>2</sub> (que en total es de 109 kg

CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> de forjado) se debe al hormigón, el 30% a las baldosas, y tan sólo el 6% al EPS.

No obstante, también es posible que materiales con menor peso concentren la mayor parte del impacto de una solución constructiva. Este es el caso de una ventana de vidrio doble con marco de aluminio. El peso del vidrio es de 20 kg, mientras que el aluminio solo pesa 5 kg. Sin embargo el 70% de las emisiones de la ventana (que ascienden a 76 kg CO<sub>2</sub>-Eq/m<sup>2</sup> de ventana) se deben al aluminio, por su alto impacto específico.

En cualquier caso, una edificación sostenible debería apostar por el aligeramiento y la desmaterialización, para la que además se pueden plantear en la actualidad numerosas opciones. Por ejemplo, el uso de botellas de vidrio ya utilizadas como material constructivo en muros externos no portantes, a razón de 80 botellas por m<sup>2</sup> conlleva una evidente reducción de los impactos al disminuir la cantidad de ladrillo y mortero necesario para construir el muro, además de reducir los costes económicos, proporcionando un buen aislamiento térmico y transmisión de luz natural, fácilmente ajustables en función de las necesidades concretas de cada zona mediante su relleno con materiales como arena o tierra, una disminución de los costes económicos, permitiendo la reutilización de las botellas. En ese mismo sentido, se pueden plantear muros exteriores no portantes construidos a partir de neumáticos usados, proporcionando una nueva utilidad a este material. Por otra parte, la absorción activa de CO<sub>2</sub> a través de los muros exteriores de los edificios es posible mediante fachadas ventiladas vegetales, utilizando paneles verticales capaces de fijar la vegetación, que además se podrían regar por goteo utilizando aguas residuales tratadas, dando lugar a “jardines verticales”. En los capítulos siguientes se analizará más detalladamente el impacto del ciclo de vida a nivel de edificio para distintas soluciones constructivas.



*Figura 3.34. Soluciones constructivas ecoeficientes para muros exteriores de viviendas*

En la actualidad, el derribo de los edificios al final de su vida útil hace que sea muy difícil separar los distintos materiales, acabando mayoritariamente en vertederos y/o incineradoras. Por ello, para que el reciclaje de los materiales de construcción sea posible es necesario promover un cambio radical en el diseño de los edificios, de forma que se favorezca el desensamblaje de los materiales constructivos al final de su vida útil. Para ello, las uniones entre los distintos materiales deberían ser reversibles, como las uniones atornilladas, evitando su adhesión en la medida de lo posible. Este importante cambio conceptual es ya una realidad en sectores como el del automóvil, donde la normativa vigente propicia que los fabricantes de automóviles diseñen los vehículos para facilitar el reciclado de sus distintos componentes a través de una adecuada selección de los materiales, cada vez más de origen reciclado, y técnicas de ensamblaje.

En este sentido, el sector de la construcción debería tomar ejemplo del sector automovilístico no sólo en cuanto a la modularidad de los diseños que permite reciclar los materiales al final de su vida útil, sino también del nivel de automatización de los procesos productivos, que permite fabricar vehículos en un tiempo promedio total de 25-35 horas, en contraste con la gran cantidad de mano de obra (mayoritariamente de baja cualificación) y el tiempo total requerido para la construcción de un edificio, que puede extenderse más de 5 años, con innumerables puntos muertos, lo que conlleva generalmente un bajo nivel de productividad.

Por ello, debería establecerse un nuevo marco normativo que promueva la construcción de edificios modulares deconstruibles y reconstruibles, que permitan aumentar el nivel de automatización de los procesos productivos, facilitar la integración de las nuevas tecnologías energéticas y de telecomunicación, mejorar las calidades constructivas e incorporar nuevos materiales de origen reciclado, reducir los costes de inversión y el tiempo de entrega e incluso permitir un fácil desmontaje y reubicación del edificio en distintos lugares. El desarrollo de edificios modulares de un nivel de calidad igual o mejor al de los edificios convencionales, supondría un importante salto tecnológico en la construcción, que ayudaría a disminuir la especulación del terreno, facilitando el acceso de los ciudadanos a las viviendas, y permitiría reconducir al sector de la construcción hacia la senda de la sostenibilidad.

Respecto al transporte de materiales, el establecimiento un nuevo mapa logístico en España en el que se promueva el transporte ferroviario de mercancías en detrimento del transporte por carretera, permitiría disminuir notablemente los impactos medioambientales del transporte, a la vez que se incrementa su productividad económica, minimizando las distintas operaciones de carga-descarga. Además el replanteamiento de la estructura de las nuevas redes, apostando por las redes malladas en detrimento de las redes radiales tradicionales del modelo logístico español, conllevaría una disminución del kilometraje, consiguiendo un sistema de transporte más ecoeficiente.



## CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE EDIFICIOS: METODOLOGÍA, APLICACIÓN Y SIMPLIFICACIONES POSIBLES

Actualmente, tal y como se ha comentado en capítulos anteriores, la metodología general del análisis de ciclo de vida está estandarizada en las normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006. Estas normas describen los principios y el marco general del ACV, pero no describen la técnica del ACV en detalle, ni tampoco especifican las metodologías concretas para las etapas del ciclo de vida a considerar. La aplicación prevista del ACV o de los resultados del análisis de inventario se considera siempre durante la fase de definición de los objetivos y el alcance del estudio, pero la aplicación en sí misma está fuera del alcance de esta normativa ISO.

Por ello, a día de hoy, no existe una metodología estandarizada de ACV específica para su aplicación en edificios. Únicamente cabe mencionar el estándar “Sustainability of construction works” del Comité Técnico 350 del Comité Europeo de Normalización (CEN/TC 350), que está en proceso de desarrollo bajo mandato de la Unión Europea para la Normalización en el campo de la gestión integral del comportamiento medioambiental de los edificios. Este estándar proporciona un método de cálculo basado en el ACV para evaluar el comportamiento medioambiental de un edificio y comunicar los resultados de la evaluación.

El objetivo de este capítulo es adaptar y aplicar las directrices del estándar metodológico propuesto por el CEN/TC 350 a tres edificios reales de bajo consumo energético (2 edificios residenciales y 1 edificio de oficinas/I+D – edificio CIRCE) ya construidos y ubicados en el municipio de Zaragoza. La selección de edificios de bajo consumo energético se justifica en base a que la normativa vigente reducirá cada vez más los consumos energéticos directos, por lo que lo interesante ahora es conocer qué impactos serán más representativos cuando los consumos directos de los edificios sean bajos.

En este capítulo se proponen procedimientos de cálculo para la obtención de todos los datos necesarios para realizar un estudio completo de ACV en un edificio. A partir de ahí se hace una interpretación de los resultados obtenidos analizando la relevancia e interrelación de cada una de las etapas consideradas, con objeto de plantear una simplificación metodológica que deje fuera de los límites del sistema aquellas etapas menos significativas y aquellos aspectos menos relevantes dentro de cada etapa, y que, al mismo tiempo, establezca cuales son los indicadores medioambientales más adecuados para su valoración en edificios.

La propuesta de una metodología simplificada de ACV pretende promover un uso más extendido del ACV entre los agentes del sector de la edificación (diseñadores de edificios -arquitectos e ingenieros-, planificadores urbanos, etc.) ayudando a superar las tradicionales barreras asociadas a la realización de este tipo de estudios y consiguiendo una edificación sostenible donde se evalúe el impacto

medioambiental de todas las etapas que forman parte de la vida útil, y no sólo de la etapa de operación del edificio, como obliga actualmente la normativa vigente.

## **4.1. Metodología**

---

Con la finalidad de que los estudios de ACV a realizar en los 3 edificios sean consistentes entre sí, en este apartado se hace una descripción completa de la metodología de ACV a aplicar en los 3 edificios, que incluye el tipo de unidad funcional, los límites del sistema y las etapas del ciclo de vida a incluir, los requisitos de la calidad de los datos utilizados y las metodologías de evaluación de impactos a aplicar. Al igual que en el capítulo 3, se opta por un ACV con enfoque estático y atributivo.

### **4.1.1. Unidad funcional**

Para analizar un edificio es posible considerar distintas unidades funcionales tales como 1 m<sup>2</sup> o un determinado espacio para que 1 persona pueda vivir o trabajar (dependiendo del tipo de edificio) durante un tiempo determinado (1 año, 50 años, etc.) con un determinado nivel de confort. No obstante, para facilitar la comparación e interpretación de los resultados obtenidos, la unidad funcional considerada en todos los estudios realizados es el edificio correspondiente durante una vida útil de 50 años, satisfaciendo las condiciones de diseño, confort térmico, etc. vigentes en España en el año de construcción del edificio. Adicionalmente los impactos obtenidos en el estudio se expresan por ocupante, por año y por superficie útil climatizada y año.

### **4.1.2. Categorías de impacto y metodologías de evaluación de impacto**

En este estudio se seleccionan las mismas categorías de impacto y metodologías de evaluación de impacto que fueron utilizadas en el capítulo 3, con las mismas hipótesis y suposiciones.

### **4.1.3. Bases de datos y requisitos de calidad de datos**

En cuanto a los requisitos de calidad de datos, se seleccionan nuevamente los inventarios existentes en la base de datos *Ecoinvent v2.0*. Únicamente para algunos materiales no disponibles en *Ecoinvent* se han incorporado datos provenientes de las bases de datos *IVAM v4.06* (2004) e *IDEMAT* (2001). Todos los inventarios utilizados han sido previamente modificados para adaptarlos al mix eléctrico de producción en España en el año 2008. Para realizar los cálculos se utiliza la aplicación *SimaPro v7.1.8*. Si bien esta aplicación no está específicamente diseñada para llevar a cabo estudios de ACV en edificios, la cantidad y calidad de las bases de datos y metodologías de evaluación de impactos incorporadas, la hacen adecuada para este propósito.



### 4.1.4. Etapas consideradas en el ciclo de vida del edificio

El estudio de ciclo de vida se ha realizado adaptando las recomendaciones planteadas por el Comité Técnico “Sustainability of construction works” CEN/TC 350 y la Agencia Internacional de la Energía (Nibel S., et al., 2005). Por ello, se han considerado las 4 etapas habituales en la vida útil de un edificio: producción, construcción, uso y fin de vida.

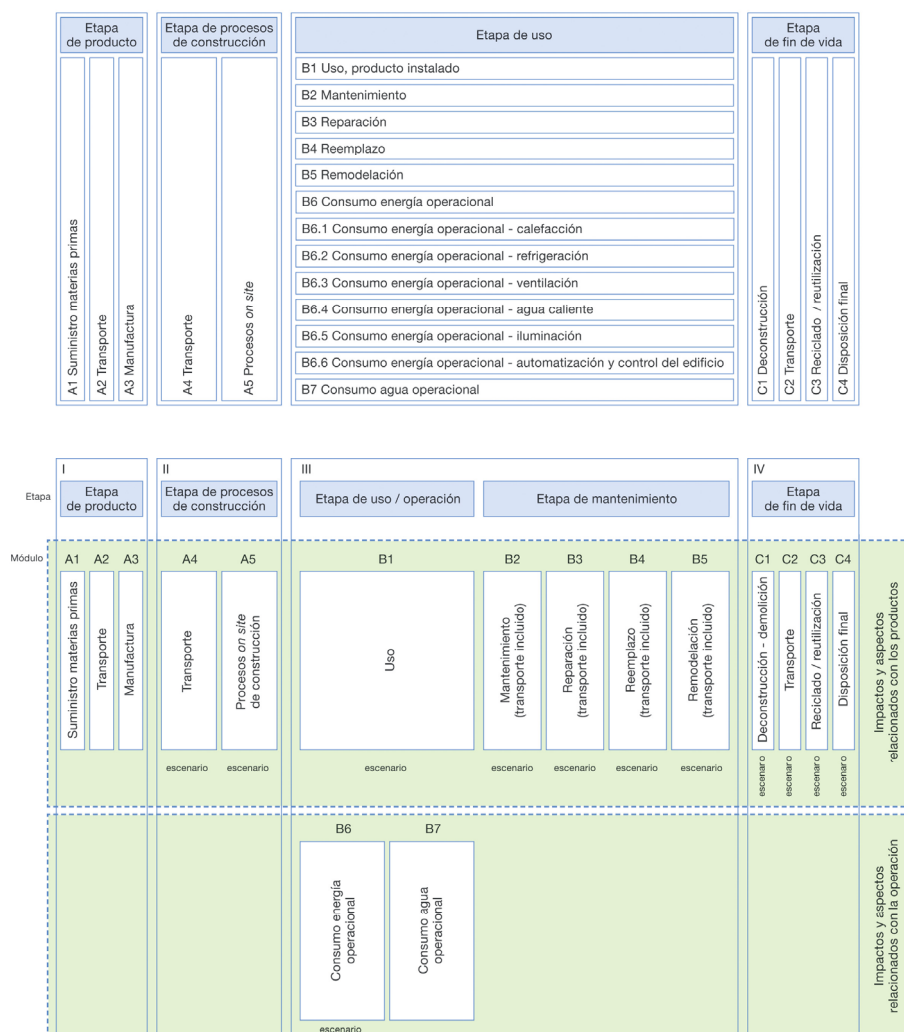


Figura 4.1. Etapas del ciclo de vida de un edificio según CEN/TC 350

A continuación se detallan cada uno de los aspectos considerados en dichas etapas, así como los procedimientos de cálculo e hipótesis realizadas para obtener los datos de entrada necesarios para realizar el estudio de ACV.

## 4.1.5. Producción del edificio

### 4.1.5.1. Materiales de construcción

Dentro de este punto se considera el suministro de materias primas, las necesidades de transporte asociadas y los procesos de fabricación en planta de todos los materiales empleados para la construcción del edificio, haciendo un análisis desde la cuna hasta la puerta de fábrica.

#### 4.1.5.1.1. Estructura y cerramientos

En la contabilidad de los materiales que componen la estructura de los edificios residenciales, se considera la aportación de los pilares y los muros de contención, así como los materiales que conforman otros componentes estructurales, como jácenas, viguetas o bovedillas necesarias para los forjados.

##### 4.1.5.1.1.1 Pilares de viviendas

A partir de los planos de los edificios residenciales se han contabilizado los elementos estructurales, su dimensión así como su composición. Se supone que todos los pilares se encuentran ejecutados en hormigón armado HA-25 N/mm<sup>2</sup>, con armadura de ferralla, siendo realizados bajo un encofrado metálico, vertido con pluma-grúa, vibrado y colocado según normas NTE-EHS y EHE.

La longitud de los pilares se calcula a partir de la altura de las plantas. Considerando el número de pilares de cada tipología que hay en cada planta y sus dimensiones (área y longitud) se obtiene el volumen de pilares correspondiente a las viviendas que hay en el edificio.

De acuerdo con los valores típicos empleados en la ejecución de edificios residenciales se considera una ratio promedio de 106 kg de acero por m<sup>3</sup> de pilar. Con este valor y tomando un valor de densidad para el hormigón vibrado de 2.400 kg/m<sup>3</sup> se puede obtener la masa de hormigón y acero necesaria para la ejecución de los pilares.

##### 4.1.5.1.1.2 Pilares del sótano-aparcamiento

En los edificios residenciales cuya zona de aparcamientos-sótano sea común a varios edificios, para imputar el impacto a cada edificio se cuantifica el impacto de toda la zona y se divide entre el número de edificios. A partir de los planos del edificio se obtiene el desglose de cada tipo de pilar para el sótano-aparcamiento.

Siguiendo un procedimiento análogo al realizado con los pilares de las viviendas se puede calcular el volumen total de los pilares del sótano-aparcamiento y desagregar la cantidad de acero y hormigón que hay en dichos pilares.

##### 4.1.5.1.1.3 Muros de contención

Se considera que la realización del muro de contención es mediante la técnica de muro pantalla encofrado a ambas caras. Los muros de contención se encuentran ejecutados con el mismo tipo de hormigón armado utilizado en los pilares.

A partir de los valores típicos empleados en la ejecución de edificios residenciales se considera una ratio promedio de 150 kg de acero por m<sup>3</sup> de muro. A partir de este valor y siguiendo el mismo procedimiento descrito para los pilares se puede obtener la masa de hormigón y acero necesaria para la ejecución de los muros. En

los edificios residenciales cuya zona de aparcamientos-sótano sea común, se imputa el impacto a cada edificio del mismo modo que se ha comentado en el epígrafe anterior.

Para valorar el impacto de la estructura se han adaptado los inventarios de *Ecoinvent v2.0* existentes para el hormigón, introduciendo las cantidades de acero anteriormente señaladas.

#### 4.1.5.1.1.4 Otros materiales estructurales y cerramientos

Para los edificios residenciales, se ha obtenido el peso y volumen de cada uno de los materiales que forman parte de los cerramientos del edificio, a partir del “Anexo de justificación y cálculo del K de los cerramientos” del Proyecto de ejecución del edificio. Para ello se ha calculado, a partir de planos, la superficie ocupada por cada tipo de cerramiento. Multiplicando dicha superficie por el espesor de cada material que compone el cerramiento se ha obtenido el volumen de cada material.

En el caso particular del edificio de oficinas/I+D analizado, debido su complejidad geométrica y a la gran variedad de soluciones constructivas incluidas, el cálculo del peso y/o volumen de cada uno de los materiales que componen tanto la estructura como los cerramientos del edificio se ha realizado a partir de los datos recogidos en el presupuesto incluido en el Proyecto Básico y de Ejecución de la “*Sede del Centro de I+D+i de Eficiencia Energética (CIRCE) en el Campus del Actur de la Universidad de Zaragoza*”. Dichos datos se han filtrado y agrupado, eliminando algunos materiales (por ejemplo, no se consideran en el inventario los tableros de madera utilizados para el encofrado, puesto que se reutilizarán para otras obras).

En todos los casos, la conversión peso-volumen se ha hecho a partir de la densidad de los materiales obtenida del programa *Lider*.

Para valorar el impacto de la estructura y los cerramientos se han adaptado algunos inventarios de *Ecoinvent v2.0* existentes para el hormigón, modificando las cantidades de acero predefinidas. En los forjados de arlita, tipo “*Farlap*” y tipo “*forel*”, las cantidades de acero presente en la capa de compresión y las viguetas es de 2,5 kg/m<sup>2</sup>, lo que considerando un espesor de 0,3 m queda en 8,3 kg de acero/m<sup>3</sup>. Por otra parte, la cantidad de acero en el hormigón para suelos es de 60 kg/m<sup>3</sup>.

Para el caso particular del edificio de oficinas/I+D se ha tomado hormigón armado, con una cantidad de acero de 80 kg/m<sup>3</sup>, zahorras compuestas en un 60% de gravas redondeadas, 15% de arena y 25% de arcilla y una composición de la grava del 50% redondeada y 50% triturada, para adecuar los inventarios a los materiales utilizados en la obra. Para algunos materiales del edificio de oficinas/I+D no disponibles en *Ecoinvent*, se han utilizado otras bases de datos. Por ejemplo, para el linóleo natural se han usado datos de *IVAM v 4.06 (2004)* e *IDEMAT (2001)*. Asimismo se han hecho otras aproximaciones: el fieltro de cañamo se ha asimilado a la lana de madera, y los inventarios de las puertas de acero y acero-vidrio se han estimado a partir de los inventarios existentes para otro tipo de puertas.

#### 4.1.5.2. Sistemas energéticos

El análisis desde la cuna hasta la puerta de fábrica de los sistemas energéticos engloba el suministro de materias primas, las necesidades de transporte asociadas y los procesos de producción en planta de los materiales empleados para la

fabricación de los equipos de generación de calor (calderas) que cubren las necesidades de calefacción y agua caliente sanitaria, los equipos de generación de frío (equipos de aire acondicionado), los equipos de aprovechamiento renovables (módulos fotovoltaicos, captadores solares térmicos y aerogeneradores) y las lámparas utilizadas para la iluminación interior del edificio.

Por tanto, se excluyen de este análisis los equipos de almacenamiento térmico (depósitos), así como los sistemas de distribución (tuberías), control y seguridad de las instalaciones. Por simplificar, no se evalúa tampoco el impacto de las estructuras de fijación necesarias para el montaje de los captadores térmicos y los módulos fotovoltaicos, pero sí se considera el impacto de la torre y anclajes asociados al aerogenerador existente en el edificio de oficinas/I+D.

Todos los datos necesarios se extraen de los Proyectos de Instalaciones y Climatización de los edificios.

Para valorar el impacto de los equipos de generación energética se han modificado los inventarios existentes en *Ecoinvent v2.0* separando el impacto de la fabricación y la disposición final de los equipos que están inicialmente agregados.

Debido a la disponibilidad de datos en *Ecoinvent* se ha supuesto que, a nivel de equipamiento, el impacto de las calderas de gas es similar al de las calderas de gasóleo, y el de los equipos de aire acondicionado similar al de las bombas de calor, aplicando factores de escala para ajustar la potencia de los equipos instalado en los edificios a la potencia considerada en los inventarios. Igualmente se han aplicado factores de escala para ajustar el volumen real de los acumuladores eléctricos y la potencia del aerogenerador a las existentes en los inventarios.

Del mismo modo, puesto que en *Ecoinvent* solo existen datos disponibles para lámparas incandescentes y de bajo consumo, se asume, por un lado, el mismo impacto de equipamiento para lámparas incandescentes y halógenas, y, por el otro, el mismo impacto de equipamiento para lámparas de bajo consumo y fluorescentes, debido a la afinidad en sus componentes.

En todos los edificios se incluye el impacto de equipamiento de las lámparas de iluminación interior. En los edificios residenciales, el número de lámparas necesarias se ha obtenido dividiendo la potencia instalada en lámparas (cuyo cálculo se detalla posteriormente en el apartado 4.1.7.1.1) entre la potencia unitaria de cada tipo de lámpara. Se ha considerado una potencia unitaria de 60 W para las lámparas que funcionan por termoresistencia (incandescentes convencionales y halógenas) y de 11 W para las lámparas que funcionan por descarga en gas (fluorescentes y bajo consumo). En el caso del edificio de oficinas/I+D, el número de lámparas necesarias se ha calculado a partir de la potencia instalada en lámparas que aparece en el “Proyecto de instalaciones eléctricas de baja tensión” que forma parte del Proyecto Básico y de Ejecución de este edificio.

#### **4.1.6.Construcción del edificio**

##### **4.1.6.1.Transporte planta-obra**

Dentro de este punto se consideran las necesidades de transporte, desde la puerta de fábrica hasta la obra, asociadas a los materiales de construcción y los sistemas energéticos del edificio. En todos los casos se considera transporte por carretera

mediante camión de 20-28t a media carga y una distancia promedio planta-obra de 100 km.

#### **4.1.6.2. Procesos on-site de construcción**

En este apartado se consideran, por un lado, los consumos energéticos de la maquinaria necesaria para la construcción del edificio, que incluye excavadoras, grúas, trituradoras de roca, etc. y, por el otro, los residuos de obra generados durante el proceso de construcción incluyendo el transporte y la disposición final de dichos residuos. Quedan fuera de los límites del sistema los impactos de fabricación de la maquinaria, al considerar que ésta se utilizará en un buen número de obras.

##### **4.1.6.2.1. Consumo energético en obra**

La energía necesaria para la construcción del edificio se desagrega en energía eléctrica y energía asociada a los combustibles consumidos por la maquinaria de obra necesaria para la realización de los trabajos de acondicionamiento del terreno y construcción del edificio.

Para poder realizar este cálculo se consideran las siguientes ratios de consumo de energía final (Kellenberger D., et al., 2007):

- Para construir 1 m<sup>3</sup> de edificio se requiere un movimiento de tierras de 0,8 m<sup>3</sup> y un consumo de gasóleo de 0,104 kg, que equivale a 1,39 kWh.
- Para construir, rehabilitar y demoler un edificio se requiere un consumo eléctrico de 0,30 kWh/m<sup>3</sup>.

Para desagregar de ésta última ratio la parte correspondiente al consumo eléctrico en la construcción, se considera que ésta será la parte que mayor peso específico tendrá en el consumo de energía con una aportación del 75% sobre el total, lo que conlleva un consumo de 0,225 kWh por cada metro cúbico construido.

De lo anterior se deduce que durante la construcción, el consumo de energía térmica es 6 veces mayor al consumo de energía eléctrica.

##### **4.1.6.2.2. Gestión de Residuos de obra**

El estudio de gestión de residuos de cada edificio se ha realizado en base al cumplimiento del Real Decreto 105/2008 que establece la obligación del productor de residuos de construcción y demolición de incluir en el proyecto de ejecución un estudio de cómo se realizará la gestión de dichos residuos, incluyendo los siguientes puntos:

- Estimación de la cantidad, expresada en toneladas y en metros cúbicos, de los residuos de construcción y demolición que se generarán en la obra.
- Las operaciones de eliminación, valorización o reutilización a que se destinarán los residuos que se generarán en la obra.

La estimación de cantidades se realiza tomando como referencia las ratios estándar más habituales sobre el volumen y tipificación de residuos de construcción y demolición. Dichas ratios se han ajustado y adaptado a las características de las

obras según cálculo automatizado realizado con ayuda del programa informático “*Construbit Residuos*”, obteniendo las ratios mostradas en la siguiente tabla.

Descripción del residuo	Ratios	
	kg/m <sup>2</sup> y planta	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> y planta
Envases que contienen restos de sustancias peligrosas o están contaminados por ellas	0,05	0,0009
Gases en recipientes a presión que contienen sustancias peligrosas	0,02	0,00008
Hormigón	0,41	0,28
Tejas y materiales cerámicos	0	0,00003
Madera	2,85	0,008
Plásticos	1,07	0,002
Tierra y piedras	8,5	0,006
Residuos mezclados de construcción	1	0,002
Papel y cartón	0,35	0,0009

Tabla 4.1. Ratios de cantidades de residuos de obra producidos

La siguiente tabla muestra el destino final de los residuos que se ha considerado, de acuerdo con la exigencia del Real Decreto 105/2008 que obliga a separar los residuos de construcción y demolición en fracciones.

Descripción del residuo	Destino	Consideraciones
Envases que contienen restos de sustancias peligrosas o están contaminados por ellas	Envío a Gestor para tratamiento	90% incineración de residuos peligrosos y 10% almacenamiento en depósitos subterráneos
Gases en recipientes a presión que contienen sustancias peligrosas	Envío a Gestor para tratamiento	90% incineración de residuos peligrosos y 10% almacenamiento en depósitos subterráneos
Hormigón	Valorización externa	Fuera de los límites del sistema
Tejas y materiales cerámicos	Valorización externa	Fuera de los límites del sistema
Madera	Valorización externa	Fuera de los límites del sistema
Plásticos	Reciclado	Fuera de los límites del sistema
Tierra y piedras	Disposición en vertedero	Vertedero municipal
Residuos mezclados de construcción	Envío a Gestor para tratamiento	Vertedero municipal
Papel y cartón	Reciclado	Fuera de los límites del sistema

Tabla 4.2. Destino de los residuos de obra producidos

Según la metodología establecida por *Ecoinvent*, los procesos de reciclado y valorización externa quedan fuera de los límites del sistema analizado. De este modo, sus efectos positivos se consideran en el nuevo producto creado a partir de dichos residuos.

#### 4.1.7. Uso del edificio

El uso del edificio incluye todos los impactos asociados a la operación y mantenimiento del edificio a lo largo de toda su vida útil.

#### 4.1.7.1. Operación

La operación del edificio engloba los consumos de energía final y de agua, así como el tratamiento de las aguas residuales generadas. Debido a la complejidad de obtener datos fiables se excluyen de la fase de operación los bienes, productos y fungibles adquiridos por dichos ocupantes, así como los residuos generados (cartón, vidrio, plásticos, etc.) en el edificio. Estos residuos se reciclan mayoritariamente, por lo que, en general, considerando la creciente concienciación hacia el reciclaje, su impacto medioambiental es cada día menor.

##### 4.1.7.1.1. Consumo de energía final

Dentro de este apartado se calculan los consumos de energía final necesarios para cubrir la demanda de calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria e iluminación interior del edificio, así como los aportes de los sistemas renovables. En todos los casos, además del impacto asociado al propio consumo se evalúa el impacto de la infraestructura de abastecimiento energético (electricidad, gas, etc.) y de agua al edificio.

A la hora de evaluar el impacto asociado al consumo de energía final, los valores de producción de origen renovable se restan a los consumos calculados. En este sentido, conviene recordar que el impacto asociado a la fabricación de los equipos de generación renovable ya se ha computado en la etapa de producción del edificio.

La demanda y el consumo de energía final se pueden calcular por medio de diferentes aplicaciones informáticas que incorporan cálculos de simulación dinámica en base horaria como *DesignBuilder* y *EnergyPlus* (Crawley D.B. et al, 2001). Dentro de este ámbito, en España cabe destacar el trabajo desarrollado en simulación energética de edificios por el Grupo de Termotecnia de la Universidad de Sevilla (Álvarez S., 1986; Molina J.L., 1987) y por el Grupo de Energía y Edificación de la Universidad de Zaragoza (Hernández M.A., et al., 2000; Turégano J.A., Hernández M.A., 2001).

En este capítulo, la demanda y el consumo energético de los edificios se han calculado utilizando el software oficial desarrollado en España para la certificación de edificios (Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2009). En España existen dos programas oficiales para realizar la certificación energética de un edificio: *Calener VYP* y *Calener GT* (Pérez-Lombard L., et al., 2009), elaborados por el Grupo de Termotecnia de la Universidad de Sevilla. El primero está diseñado para certificar edificios residenciales y pequeños comercios, mientras que el segundo está diseñado para certificar edificios terciarios de tamaño mediano-grande.

Ambos son de uso libre y están basados en la simulación energética, pero las suposiciones, hipótesis y cálculos son bastante diferentes. El motor de cálculo utilizado en *Calener GT* es *DOE 2.2 v4.2a*, que es un programa de simulación en base horaria que permite calcular los consumos energéticos. Sin embargo, *Calener VYP* utiliza un motor de cálculo de simulación dinámica en base horaria junto con la aplicación *Lider*, ambos desarrollados íntegramente en la Universidad de Sevilla. Por otra parte, *Calener VYP* no calcula el consumo de energía para la iluminación interior, al considerar que este consumo es bastante bajo en los hogares, mientras que *Calener GT* sí tiene en cuenta este consumo, ya que suele ser muy representativo en los edificios terciarios.

Dichos programas proporcionan resultados tales como la demanda de energía para calefacción y refrigeración a partir de la definición de la envolvente del edificio, y el consumo de energía final para calefacción, refrigeración y agua caliente (también para iluminación en *Calener GT*), calculado como el cociente entre la demanda de energía previamente calculada y el rendimiento medio estacional de los equipos energéticos. Dicho rendimiento es calculado a partir de las condiciones atmosféricas y las curvas de comportamiento de dichos equipos, que modelizan matemáticamente su comportamiento en función de determinadas variables externas a los mismos como la temperatura exterior o el nivel de carga de trabajo. Asimismo se tienen en cuenta las cargas internas debidas a la ocupación, el equipamiento y la iluminación. En viviendas, las cargas internas se modelan a partir de unos valores por defecto no editables; mientras que en terciarios, debido a su mayor repercusión, sus valores son completamente modificables.

Conviene destacar que los programas *Calener* no son “programas singulares”, ya que sus motores de cálculo están validados a través de los tests de la Agencia Internacional de la Energía (*BESTEST-Building Energy Simulation Test*). Por lo tanto, los resultados obtenidos en *Calener* son generalmente del mismo orden de magnitud que los obtenidos con otras herramientas existentes para la simulación energética de edificios (Macías M., et al., 2005). Para confirmar este punto, la demanda energética se ha calculado en el caso de los edificios residenciales a través de las aplicaciones *DesignBuilder* y *Lider*, mientras que en el edificio de oficinas/I+D se han utilizado las aplicaciones *TSBI3* (Johnsen K., Grau K., 1994) y *Calener GT* a efectos de contrastar los valores obtenidos.

El consumo de energía final para iluminación interior de los dos edificios residenciales, se ha calculado mediante un procedimiento específico, puesto que la aplicación *Calener VYP* no considera dicho consumo. El cálculo se ha realizado para cada estancia (considerando las viviendas y las zonas comunes) a partir de la potencia instalada en lámparas y auxiliares y del número de horas de encendido estimadas. Dentro de las viviendas, se han considerado 2,5 h/día de funcionamiento para sala de estar, 1 h/día para cocina y aseo-baños y 0,5 h/día para el resto de estancias. En las zonas comunes, se han supuesto 4 h/día para el garaje-sótano, 3 h/día para portales, 1 h/día para escaleras y 0,5 h/día para trasteros y sala de calderas. La potencia instalada en lámparas (en W) se calcula dividiendo la potencia lumínica necesaria (en lúmenes) entre la eficiencia lumínica de las lámparas (en lúmenes/W). El tipo de lámparas para cada estancia, su eficiencia lumínica y la potencia necesaria para los equipos auxiliares se ha supuesto a partir de los valores más habituales, tal como muestra la siguiente tabla.

Estancia	Tipo de lámpara	Eficiencia de lámpara (lm/W)	Potencia auxiliares (%)
Dormitorio	Incandescente convencional	12	0
Cocina y sótano-garaje	Fluorescente	80	25
Resto de estancias (pasillo-escalera, aseo-baños, sala de estar, portal, trastero y sala de calderas, etc.)	Halógena	25	10

Tabla 4.3. Especificaciones de los tipos de lámpara considerados

Finalmente, la potencia lumínica necesaria se ha estimado a partir de los valores de iluminancia media mantenida ( $\text{lm/m}^2$ ) más usuales para cada estancia y de la superficie de cada estancia ( $\text{m}^2$ ) calculada a partir de los planos del edificio. En el caso del edificio de oficinas/I+D, el consumo de energía final para iluminación



interior se calcula a partir de la aplicación *Calener GT*, que sí incluye este tipo de cálculo.

Para valorar el impacto de los consumos de refrigeración e iluminación se consideran los inventarios de *Ecoinvent v2.0* para el consumo eléctrico en baja tensión, mientras que para los consumos de calefacción, agua caliente y el aporte solar térmico se consideran los inventarios para el consumo de gas en calderas.

#### 4.1.7.1.2. Aporte de sistemas energéticos renovables

Seguidamente se detalla el procedimiento de cálculo de la producción energética para cada uno de los posibles sistemas existentes de energías renovables integrados en los edificios, que se restará a los consumos de energía final de dichos edificios.

##### 4.1.7.1.2.1 Energía solar fotovoltaica

La metodología propuesta para el cálculo de la producción energética que se podría obtener de los módulos fotovoltaicos, comienza con el análisis del potencial solar en la zona donde se ubica el edificio. Para ello se ha optado por el empleo de la base de datos horaria del software *Meteonorm*, empleando dichos valores como inputs en el programa de simulación de instalaciones fotovoltaicas *PvSyst 4.37* (Mermoud A., 1996), disponible en <http://www.pvsyst.com/ch>, desarrollado por la Universidad de Génova (Suiza) para el dimensionado y simulación de sistemas fotovoltaicos.

A la hora de realizar las simulaciones se presentan tres opciones de cálculo:

- “No shading”: No se consideran pérdidas por sombreadamiento.
- “Linear shading”: Se considera que la pérdida energética producida por el sombreadamiento es proporcional al área sombreada.
- “Module string shading”: Se considera que en el momento que un ramal está sombreado, todo el ramal deja de producir energía.

El comportamiento real de las instalaciones estaría entre las dos últimas opciones de cálculo, tal como recomienda el desarrollador de esta metodología. Por ello, en este estudio se ha tomado como resultado final, la media de los resultados obtenidos mediante las opciones “Module string shading” y “Linear shading”.

##### 4.1.7.1.2.2 Energía solar térmica

Para estimar la producción energética anual del sistema solar térmico se selecciona el método de las curvas *f-chart* (Klein S.A., Beckman W.A., Duffie J.A., 1976; Duffie J.A., Mitchell J.W., 1983), basado en técnicas empíricas desarrolladas por los profesores Klein, Duffie y Beckman en los años 1976-77. Si bien existen herramientas de cálculo más precisas (especialmente para periodos cortos de tiempo) basadas en simulaciones dinámicas de modelos reales de sistemas solares térmicos, su complejidad hace que se haya optado por el método *f-chart*, comúnmente utilizado para el cálculo de este tipo de instalaciones, cumpliendo con los requisitos establecidos en el Código Técnico de la Edificación y el Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios.

La metodología *f-chart* consiste en obtener, a partir de una serie de correlaciones experimentales, la cobertura solar de la instalación, es decir, el porcentaje de

demanda energética de agua caliente sanitaria que se puede llegar a cubrir con aportación solar. Este porcentaje puede obtenerse a partir del cálculo de la superficie captadora y del volumen de acumulación de la instalación (Zabalza I., Aranda A., 2009).

#### 4.1.7.1.2.3 Energía eólica

La producción eléctrica del aerogenerador está condicionada por el potencial eólico de la zona y la curva de potencia del aerogenerador. Para la obtención de los valores de velocidad de viento, ante la falta de datos medidos in-situ en las inmediaciones de los edificios, se utilizan los datos recogidos por la estación meteorológica situada en el aeropuerto de Zaragoza. (Latitud: 41°40'03"N, Longitud: 01°02'26"O). El anemómetro de dicha estación se sitúa a 23 m de altura sobre el suelo.

La siguiente tabla muestra la distribución de velocidades y los parámetros  $A$  y  $k$  que reflejan la forma de la distribución de *Weibull* de velocidades para las distintas orientaciones, sectorizadas cada 30°.

Sect	Freq	<1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	13	15	17	>17	A	k
0	2.4	466	112	114	78	64	29	24	20	20	31	19	10	6	8	2.4	0.76
30	2.0	550	129	166	62	51	14	10	1	0	1	0	2	3	10	1.7	0.70
60	3.9	328	126	185	174	100	49	26	5	3	3	1	0	1	0	2.9	1.53
90	10.4	150	115	194	177	158	92	63	27	12	9	1	0	0	0	3.9	1.88
120	8.8	155	120	187	161	120	92	76	40	19	20	5	1	1	1	4.1	1.50
150	2.8	453	147	170	90	57	33	23	10	9	8	1	0	0	0	2.2	1.11
180	2.0	582	121	110	77	42	27	22	6	3	8	0	0	1	0	1.5	0.87
210	2.5	483	90	113	84	58	51	43	18	22	27	7	1	1	1	2.5	0.96
240	5.6	225	105	130	102	77	69	69	51	46	79	28	12	5	2	4.7	1.31
270	15.2	87	54	86	93	107	113	118	102	63	104	45	19	8	1	6.8	2.00
300	29.5	49	32	69	80	101	90	108	97	82	165	79	35	9	3	7.9	2.24
330	14.8	89	39	68	69	80	78	85	91	83	183	86	38	8	3	8.1	2.29
Total	100.0	154	71	110	102	100	82	83	68	53	101	46	20	6	2	6.0	1.58

Tabla 4.4. Distribución de velocidades del viento en el aeropuerto de Zaragoza

Puesto que estos datos sólo se utilizan para el edificio de oficinas/I+D, no se han considerado factores de corrección por la orografía, ya que dicho edificio no se ve afectado por obstáculos significativos. Para determinar la producción se han considerado todos los sectores, cubriendo así cualquier dirección de viento posible. Combinando los valores de la curva de potencia del aerogenerador con la distribución de vientos se obtiene la producción de energía eléctrica para las distintas velocidades de viento.

#### 4.1.7.1.3. Consumo de agua potable

Dentro de este apartado se considera el transporte y tratamiento de agua fría y caliente desde su captación hasta su consumo en el edificio.

Para calcular el consumo de agua de los edificios se han tomado las ratios de la Unidad de Tasas y Precios Públicos del Servicio de Gestión Tributaria del Ayuntamiento de Zaragoza (en adelante Unidad de Tasas). En el caso del edificio de oficinas/I+D se han completado con algunas ratios existentes en la bibliografía (Fundación Ecología y Desarrollo, 2003).

Además se han tomado en consideración en algunas fases de cálculo otras ratios publicadas (Barberán R., et al., 2007), obtenidas como resultado de investigaciones

realizadas en la Universidad de Zaragoza para modificar las tarifas de usos residenciales por el ciclo del agua en la ciudad de Zaragoza.

Desde la Unidad de Tasas se posee por tanto un conocimiento concreto y exacto de los consumos de agua en el municipio de Zaragoza, distinguiendo incluso por usos parciales. Algunos de estos usos se distinguen únicamente por motivos operativos (diferenciar distintas tarifas por ejemplo) y otros para realizar distintos proyectos de I+D, como el estudio y monitorización de consumos energéticos y de agua que se está realizando en Ecociudad Valdespartera, como parte del Proyecto *Renaissance* (CONCERTO, VI Programa Marco) u otras iniciativas dentro del marco del Proyecto *Switch*, promovido por la UNESCO para caracterizar el consumo doméstico de la ciudad y la influencia de determinadas intervenciones (tarifas, tecnologías, y sensibilización) en la evolución de ese consumo. Para ello se han monitorizado con contadores electrónicos más de 400 viviendas del barrio zaragozano del Actur, a las que se les toma lectura diaria, acumulando datos por tramos horarios.

Como resultado de estos estudios, la normativa existente y la implementación de dispositivos ahorradores de agua en el parque edificatorio de la ciudad se observa un descenso en el consumo total de agua doméstica desde el año 2000 como se muestra en la siguiente figura. Todo ello a pesar de que la población ha aumentado un 11,5% en el periodo 2000-2008, pasando de 604.631 a 674.317 habitantes.

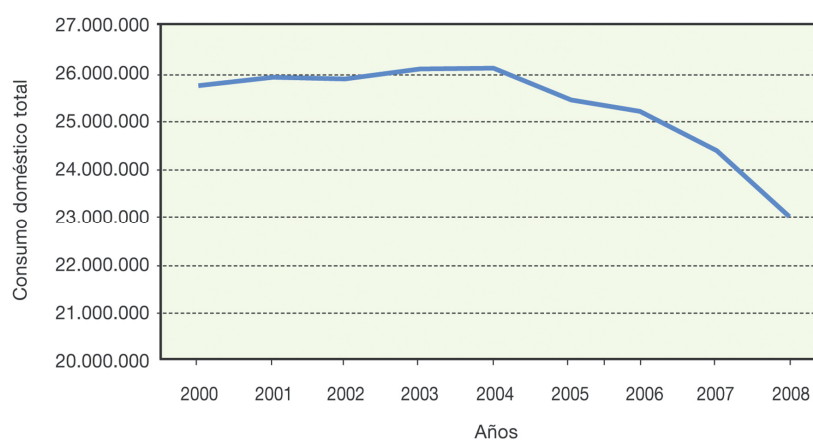


Figura 4.2. Evolución del consumo doméstico (en m<sup>3</sup>/año) en Zaragoza en el periodo 2000-2008

En base a estos estudios previos se observa que el consumo de agua en el sector residencial depende de las características de los hogares y las viviendas, así como de la concienciación de los usuarios. Las variables dependientes de los usuarios (edad, sexo, nivel de estudios, ingreso personales netos, situación profesional, etc.) no se han tenido en cuenta en el presente estudio debido al desconocimiento de la futura ocupación y evolución de las mismas a lo largo de la vida útil de los edificios analizados. Sin embargo, sí se consideran variables constructivas (número de dormitorios, número de baños, existencia de dispositivos ahorradores de agua, etc.) en el momento de la elección de las ratios a tomar para el cálculo del consumo total de agua potable de los edificios residenciales.

Por todo ello, en los edificios residenciales, se han tomado como ratios finales para realizar los cálculos las presentadas en la siguiente figura, donde se muestra el consumo de agua en función del número de ocupantes de la vivienda. Según el *Green Building Council España*, por término medio, el 60-65% del agua consumida en los hogares se emplea en baños y servicios, el 30-35% en la cocina y tan sólo el 2% corresponde al consumo de agua de boca.

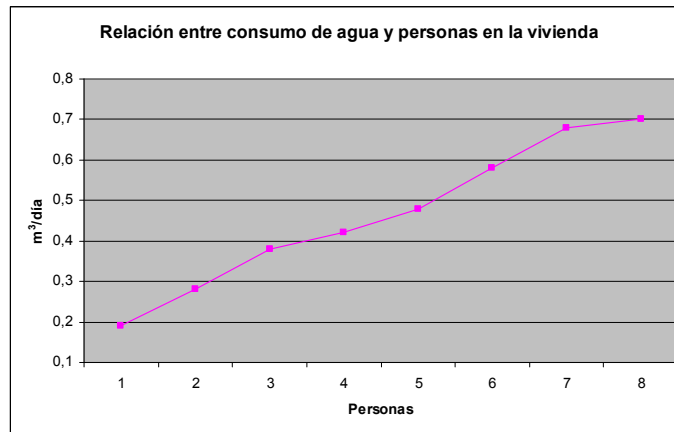


Figura 4.3. Ratio de consumo de agua (en m<sup>3</sup>/día) según el n° de personas de la vivienda

Estas ratios están en consonancia con otras estadísticas disponibles. Así, según el Observatorio de la Sostenibilidad en España, el consumo medio de agua en las capitales de provincia españolas (a partir de los datos ofrecidos por los ayuntamientos) es de 149,6 l/habitante y día, siendo de 116,1 l/habitante y día para la ciudad de Zaragoza, observándose un menor consumo conforme mayor es el tamaño de la ciudad (Ayuso A.M., et al., 2008). Según encuestas realizadas por el INE, estos consumos serían algo mayores, estableciéndose un consumo medio de 166 l/habitante y día para los hogares españoles. Conviene hacer notar que en viviendas unifamiliares que dispongan de jardines y piscinas se pueden llegar a consumir más de 450 l/habitante y día (Cuchí A., 2010).

Para calcular el número de habitantes por vivienda se toma como válida la relación publicada en el Código Técnico de la Edificación - Documento Básico de Ahorro de Energía HE-4 (en adelante, CTE-DB-HE4) que se presenta en la siguiente tabla.

<b>Número de Dormitorios</b>	1	2	3	4	5	6	7	más de 7
<b>Número de Personas</b>	1,5	3	4	6	7	8	9	n° de dormitorios

Tabla 4.5. Número de habitantes en función del número de dormitorios por vivienda

Por su parte, en el sector terciario, el consumo de agua depende principalmente del número de dispositivos consumidores de agua, de las actividades que se desempeñan en su interior (suciedad y esfuerzo físico asociado) y, al igual que en los edificios residenciales, de la concienciación de los usuarios. En el caso del edificio de oficinas/I+D, para realizar los cálculos se han tomado como ratios el caudal exigido por la normativa en cada uno de los sistemas consumidores y la

estimación de usos y duraciones publicadas en la bibliografía (Fundación Ecología y Desarrollo, 2003).

En todos los edificios, a la hora de valorar el impacto de estos consumos de agua se incluyen los consumos energéticos asociados al bombeo, filtrado, depuración, y potabilizado así como las infraestructuras necesarias para llevar el agua desde el punto de captación hasta el edificio, a partir de los inventarios de *Ecoinvent v2.0*.

#### 4.1.7.1.4. Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales de un edificio consiste en un conjunto de procesos de tratamiento de aguas, los cuales tratan y remueven contaminantes físicos, químicos y biológicos del agua efluente del uso humano (Domouso F.J., Acha C., 2006).

Estas aguas pueden ser tratadas dentro del sitio en el que se generan (por ejemplo: tanques sépticos u otros medios de depuración) o recogidas y llevadas mediante una red de tuberías, y eventualmente bombas, a una planta de tratamiento municipal, que es la situación más común y el escenario que se va a considerar en los edificios analizados.

Los esfuerzos para coleccionar y tratar las aguas residuales de edificios residenciales y terciarios están típicamente sujetos a regulaciones y normativas locales, regionales y nacionales, por lo que, en este caso, se ha tomado un tratamiento de clase 3, que incluye el impacto de las infraestructuras de transporte y tratamiento (depuradoras) municipales y su desmantelamiento, así como la ocupación del terreno.

Se ha considerado una depuradora de tamaño medio-grande, con una capacidad de tratamiento de aguas para una población equivalente de 1.200.000 habitantes, que se corresponde aproximadamente con la capacidad de depuración en el municipio de Zaragoza. La población equivalente es el resultado de dividir los kilogramos de DBO (Demanda Biológica de Oxígeno) contenidos en las aguas residuales, entre la DBO generada diariamente por un habitante, cuyo valor medio en Europa es de 60 gramos.

El tratamiento considerado en este tipo de plantas se realiza en tres etapas. La separación física inicial de sólidos de la corriente de aguas residuales, seguida por la conversión progresiva de materia biológica disuelta en una masa biológica sólida usando bacterias adecuadas, generalmente presentes en estas aguas. Una vez que la masa biológica es separada o removida, al agua tratada se le produce una desinfección adicional mediante procesos químicos.

A la hora de valorar el impacto de estos tratamientos del agua, se incluyen los consumos energéticos en filtrado, depuración, etc. así como las infraestructuras necesarias para llevar el agua desde el edificio hasta el punto de vertido, considerando los inventarios de *Ecoinvent v2.0*.

#### 4.1.7.2. Mantenimiento

El mantenimiento del edificio incluye únicamente el reemplazo de ventanas y puertas, así como de los equipos de generación energética para calefacción, agua caliente sanitaria, refrigeración, iluminación y equipos de aprovechamiento de energías renovables (módulos fotovoltaicos, captadores solares térmicos y aerogeneradores). Quedan fuera de los límites del sistema las operaciones de limpieza y repintado de muros y tabiques del edificio, así como las posibles

reparaciones y operaciones de mantenimiento correctivo requeridas a lo largo de su vida útil por los sistemas energéticos y cerramientos del edificio, debido a su escasa incidencia sobre el impacto total.

#### **4.1.7.2.1.Reemplazo de materiales de construcción**

Aunque alguno de los materiales que forman parte de los cerramientos del edificio puede requerir su sustitución, se considera, por simplicidad, que los cerramientos del edificio tienen una vida útil similar a la del edificio. Asimismo se estima que la vida útil de la estructura será igual a la del edificio, por lo que se decide dejar este punto fuera de los límites del sistema.

De este modo, dentro de este apartado, se considera únicamente la sustitución de puertas y ventanas a los 25 años. Por simplicidad, se considera que las especificaciones técnicas de las nuevas ventanas y puertas serán similares a las originales.

Por tanto, en este apartado se evalúa el impacto asociado a la fabricación de las nuevas puertas y ventanas a instalar en el edificio y su transporte desde la planta de fabricación hasta el edificio, considerando una distancia promedio de 100 km y el peso total correspondiente a las puertas y ventanas. La disposición final de todas las puertas y ventanas reemplazadas a lo largo de la vida útil del edificio no se evalúa aquí, sino que se incluye dentro de la etapa de fin de vida del edificio.

#### **4.1.7.2.2.Reemplazo de sistemas energéticos**

Se estima que los equipos generadores de calor y frío para cubrir la demanda de calefacción, agua caliente sanitaria y refrigeración, así como los equipos de aprovechamiento de energías renovables tengan una vida útil de 25 años, por lo que en la mitad de la vida útil del edificio será necesaria su sustitución. Por simplicidad se considera que la curva de rendimiento de los nuevos equipos generadores será similar a la de los equipos originales.

Asimismo se considera la necesaria sustitución de las lámparas de iluminación interior a medida que se vayan fundiendo, teniendo en cuenta su vida útil y régimen de uso. Dividiendo el número total de horas de funcionamiento requerido para las lámparas de iluminación entre la vida útil de cada lámpara se obtiene el número de reemplazos necesarios para cada estancia. Al multiplicar el número de reemplazos por la potencia total instalada en lámparas y dividir entre la potencia unitaria de cada lámpara se obtiene el número total de lámparas necesarias en cada estancia a lo largo de la vida útil del edificio. Por último, el nº de lámparas a reponer se obtiene restando el número total de lámparas necesarias y el número inicial de lámparas calculado anteriormente.

Por tanto, en este apartado se considera el impacto asociado a la fabricación de los nuevos equipos generadores, equipos de aprovechamiento renovables y lámparas de iluminación interior a instalar en el edificio y su transporte desde la planta de fabricación hasta el edificio, suponiendo en todos los casos una distancia promedio de 100 km y su peso correspondiente. La disposición final de todos los equipos reemplazados a lo largo de la vida útil del edificio no se evalúa aquí, sino que se considera dentro de la etapa de fin de vida del edificio.

### 4.1.8. Fin de vida del edificio

Dentro de esta etapa, se considera para cada material el escenario de disposición final más probable de entre los siguientes: eliminación en vertedero o incineradora, envío a planta de clasificación para su reciclado parcial y reciclaje directo del material en el punto de demolición.

Según la metodología establecida por *Ecoinvent*, el proceso de reciclado de materiales extraídos del edificio fácilmente reciclables (como el aluminio) queda fuera de los límites del sistema analizado. De este modo, los efectos positivos del reciclaje se consideran en el nuevo producto creado a partir del material reciclado.

#### 4.1.8.1. Materiales de construcción

En este apartado se incluyen los procesos de deconstrucción, transporte y disposición final de todos los materiales de construcción utilizados durante la vida útil del edificio.

Generalmente los inventarios consideran la energía y las emisiones de partículas asociadas a los procesos de demolición necesarios para extraer los materiales del edificio, el transporte mediante camión al punto de eliminación (vertedero o incineradora) situado a 10-15 km del edificio demolido y la disposición final del residuo, que suele ser inerte.

##### 4.1.8.1.1. Estructura

Para valorar el impacto del fin de vida de los elementos estructurales del edificio se han adaptado los inventarios de *Ecoinvent v2.0* existentes para la disposición final del hormigón armado en vertedero, introduciendo las cantidades de acero anteriormente señaladas en el apartado 4.1.5.1.1.

##### 4.1.8.1.2. Cerramientos

Las cantidades de residuos asociados a cerramientos son las que aparecen en el inventario de materiales de la envolvente del edificio, salvo para puertas y ventanas, donde hay que considerar también el fin de vida de las puertas y ventanas reemplazadas en la mitad de la vida útil del edificio.

El impacto del fin de vida de todos los materiales que forman parte de los cerramientos del edificio se calcula a partir de los inventarios de *Ecoinvent v2.0* modificando para el caso del hormigón armado, su disposición final en vertedero, a partir de las cantidades de acero anteriormente señaladas en el apartado 4.1.5.1.1.

Para la mayor parte de los materiales, la eliminación se realiza a través de un vertedero. Únicamente materiales susceptibles de valorizar como el poliestireno, la tela asfáltica, el polipropileno, el corcho, el cáñamo, el zinc, las distintas maderas utilizadas, el linóleo natural y los impermeabilizantes *EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer)* se considerará que se eliminan a través de una incineradora.

#### 4.1.8.2. Sistemas energéticos

Dentro de este punto se evalúan los procesos de deconstrucción, transporte y disposición final de todos los equipos de generación de calor para cubrir las necesidades de calefacción y agua caliente sanitaria, los equipos de generación de frío, los equipos de aprovechamiento renovables y las lámparas utilizadas para la iluminación a lo largo de la vida útil del edificio. Conviene reseñar la inclusión en este apartado tanto de los equipos energéticos inicialmente instalados (apartado 4.1.5.2) como de todos los equipos energéticos reemplazados (apartado 4.1.7.2.2) en la mitad de la vida útil del edificio.

Tal como se comentó en el apartado 4.1.5.2 para valorar el impacto de la disposición final de todos los equipos de generación energética se han modificado los inventarios existentes en *Ecoinvent v2.0* separando el impacto de la fabricación y la disposición final de los equipos que estaban inicialmente agregados. Por otra parte, puesto que en la base de datos *Ecoinvent v2.0* sólo existen datos disponibles para lámparas incandescentes y de bajo consumo, se asume el mismo impacto del fin de vida, por un lado, para lámparas incandescentes y halógenas, y, por el otro, para lámparas de bajo consumo y fluorescentes.

### 4.2. Edificio residencial nº 1

En este apartado se presentan los datos de entrada considerados en el estudio de ciclo de vida del bloque sur de la Parcela 12 Sector 89/4 de Valdespartera (Zaragoza).

#### 4.2.1. Descripción general del edificio

En 2001, el Ayuntamiento de Zaragoza y el Ministerio de Defensa firmaron un Convenio, por medio del cual un total de 243,2 hectáreas de tierra correspondientes al antiguo cuartel de Valdespartera pasaron a ser propiedad de la ciudad, con objeto de promover su desarrollo urbanístico para la construcción de pisos junto con otras instalaciones en la zona sur de la ciudad.

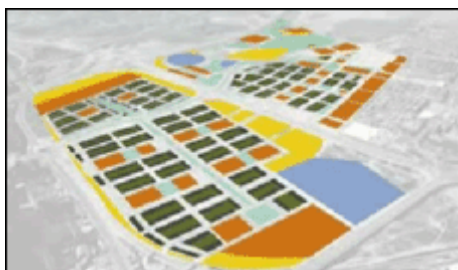


Figura 4.4. Proyecto de urbanización de la ecociudad Valdespartera

Posteriormente el Ayuntamiento de Zaragoza redactó el Plan Parcial para la urbanización del sector 89/4 (Valdespartera) que fue aprobado por la Corporación a finales de 2002, estableciendo una capacidad total de construcción de 9.687 viviendas (el 97% de protección oficial), así como diversos usos terciarios.

La parcela 12 sector 89/4 forma parte de este Plan y está compuesta por tres bloques de edificios de similares características que disponen de una planta subterránea de garaje de uso compartido.



El edificio objeto del estudio es el denominado bloque sur. Dicho edificio está compuesto por seis plantas con una superficie útil habitable (climatizada) total de 4.842,94 m<sup>2</sup>, un total de 60 viviendas y 235 ocupantes.



Figura 4.5. Imágenes del edificio n° 1 objeto del estudio: Fachadas norte y sur (arriba) y detalle de los invernaderos y captadores solares térmicos del edificio (abajo)

La planta sótano-garaje consta de un total de 160 plazas de aparcamientos y de 100 trasteros, de los que aproximadamente 69 plazas y 40 trasteros corresponden al bloque sur. La planta baja consta de 10 viviendas: 5 viviendas de 80 m<sup>2</sup> y otras 5 de 60 m<sup>2</sup>, a las que se accede a través de 5 portales. Las plantas 1 – 5 son similares, estando formadas por 10 viviendas de 80 m<sup>2</sup>, mientras que la planta 6 alberga 26 trasteros y la sala de calderas común.

Planta	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )
Sótano-garaje	1.645,3	3,75	6.169,9
Planta baja	922	2,9	2.673,8
Planta primera	922	2,9	2.673,8
Planta segunda	922	2,9	2.673,8
Planta tercera	922	2,9	2.673,8
Planta cuarta	922	2,9	2.673,8
Planta quinta	922	2,9	2.673,8
Planta sexta	463,89	2,7	1.252,5
TOTAL	7.641,19	-	23.465,2

Tabla 4.6. Definición de las plantas del edificio n° 1

## 4.2.2. Datos de entrada

### 4.2.2.1. Producción del edificio

#### 4.2.2.1.1. Materiales de construcción

##### 4.2.2.1.1.1 Estructura y cerramientos

La siguiente tabla refleja las distintas tipologías de pilares existentes en cada una de las plantas de viviendas del edificio.

Dimensiones (mm)	200 x 800	300 x 300	300 x 400	350 x 350	350 x 400	350 x 500	350 x 600	400 x 450	400 x 500
Planta 1	10	0	48	12	15	4	10	12	7
Planta 2	0	0	54	0	0	0	0	0	0
Planta 3	0	0	54	0	0	0	0	0	0
Planta 4	0	0	54	0	0	0	0	0	0
Planta 5	0	0	54	0	0	0	0	0	0
Planta 6	0	0	54	0	0	0	0	0	0

Tabla 4.7. Número de pilares existentes en las distintas plantas de viviendas del edificio nº1 según las dimensiones de los pilares

Conociendo la longitud de los pilares, se obtiene el volumen de pilares correspondiente a viviendas, tal como muestra la siguiente tabla.

Dimensiones (mm)	200 x 800	300 x 300	300 x 400	350 x 350	350 x 400	350 x 500	350 x 600	400 x 450	400 x 500
Área (m <sup>2</sup> )	0,16	0,09	0,12	0,12	0,14	0,18	0,21	0,18	0,2
Nº total de pilares	10	8	318	12	15	4	10	12	7
Longitud total (m)	25	20	795	30	37,5	10	25	30	17,5
Volumen (m <sup>3</sup> )	4	1,8	95,4	3,675	5,25	1,75	5,25	5,4	3,5

Tabla 4.8. Cálculo del volumen total de los pilares de las viviendas del edificio nº 1

Agregando el volumen de cada tipología de pilares se obtiene el volumen total de pilares de viviendas, que asciende a 126 m<sup>3</sup>. Este valor indica el volumen de espacio total que ocupan los pilares, que debe desagregarse en hormigón y acero.

La siguiente figura muestra la vista en planta de los 3 bloques que conforman la parcela 12 y la zona de aparcamiento subterráneo.



Figura 4.6. Vista general de la planta baja de la parcela 12 (izqda.) y de los aparcamientos de la parcela 12 (dcha.)

El número de pilares para el sótano-aparcamiento y su volumen total, desglosado por cada tipo de pilar, se indican en las siguientes tablas.

Dimensiones (mm)	300 x 300	300 x 350	300 x 450	350 x 350	350 x 400	350 x 500	350 x 600	400 x 450	400 x 500
Sótano	36	3	1	36	48	17	20	34	19

Tabla 4.9. Número de pilares existentes en el sótano-aparcamiento del edificio nº 1 según las dimensiones de los pilares

Dimensiones (mm)	300 x 300	300 x 350	300 x 450	350 x 350	350 x 400	350 x 500	350 x 600	400 x 450	400 x 500
Volumen (m³)	8,1	0,79	0,34	11,03	16,8	7,44	10,5	15,3	9,5

Tabla 4.10. Cálculo del volumen total de los pilares del sótano-aparcamiento

Agregando el volumen de cada tipología de pilares se obtiene el volumen total de pilares del aparcamiento, que asciende a 79,78 m³. Al realizarse el cálculo de los pilares sobre el total del aparcamiento, para conocer la aportación al bloque analizado en este estudio se divide dicho valor entre 3, quedando un volumen de 26,59 m³.

Puesto que los 3 bloques de la parcela 12 cuentan con un aparcamiento subterráneo, se tiene una estructura formada por muros de contención en la parte perimetral de dichos bloques y en la parte central correspondiente a la zona común a los bloques. En la siguiente figura se marca la zona donde se encuentran las estructuras formadas por muros de contención.



Figura 4.7. Muros de contención de los edificios de la parcela 12 (resaltados en color rojo)

El espesor del muro es de 300 mm, y su altura es de 3.300 mm incluyendo el tacón, tal como muestra la siguiente figura.

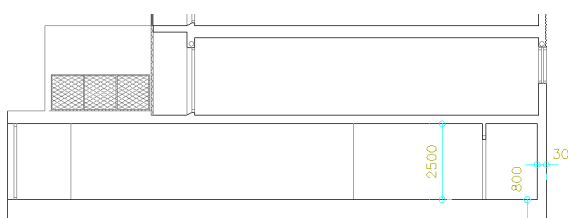


Figura 4.8. Dimensiones de los muros de contención del edificio nº 1

Conociendo la longitud de muro de contención necesaria para la ejecución de los 3 bloques de la parcela, que es de 541 metros lineales y el área de la sección transversal del muro, que es de  $1 \text{ m}^2$ , se puede calcular el volumen total del muro de contención, que asciende a  $541 \text{ m}^3$ . Para calcular el volumen de los muros de contención correspondientes al edificio analizado, se divide entre 3 el volumen anterior, quedando un volumen de  $180,3 \text{ m}^3$ .

A modo de resumen, la siguiente tabla muestra la cantidad y tipología de hormigón armado considerado para los pilares y muros de contención de la estructura.

	Volumen (m <sup>3</sup> )	Material	Cantidad de hormigón (t)	Cantidad de acero (t)	Cantidad total (t)
Pilares de viviendas	126	Hormigón armado HA-25, 106 kg/m <sup>3</sup> de acero	289,044	13,356	302,4
Pilares de sótano-aparcamiento	26,59	Hormigón armado HA-25, 106 kg/m <sup>3</sup> de acero	61,006	2,818	63,824
Muros de contención	180,3	Hormigón armado HA-25, 150 kg/m <sup>3</sup> de acero	404,950	27,050	432
TOTAL			755	43,224	798,224

Tabla 4.11. Inventario de materiales de la estructura del edificio nº 1

La siguiente tabla muestra la superficie total de cada cerramiento del edificio, desglosando los materiales que lo componen, e indicando su volumen, densidad y peso. Conviene hacer notar que el forjado alveolar y ligero “Farlap” y el hormigón que aparecen en la tabla forman parte también de la estructura del edificio.

Cerramiento	Superficie (m <sup>2</sup> )	Material	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Peso (t)
Muros exteriores	2.752,90	Aislante Fibra de vidrio tipo I	137,27	125	17,16
		Bloque de hormigón 15 cm (no armado)	160,15	685	109,70
		Placa de cartón-yeso	34,32	1.040	35,69
		Placa de acero galvanizado, espesor: 2 mm	6,86	7.500	51,48
Muros mäsicos exteriores	616,40	Revestimiento monocapa	6,16	1.250	7,71
		Bloque cerámico de arcilla aligerada, espesor: 24 cm	147,94	920	136,10
		Placa de cartón-yeso	92,46	900	83,21
Tabiques	6.266,25	Placa de cartón-yeso	449,87	900	404,88
		Aislante Fibra de vidrio tipo I	154,31	125	19,29
Forjados	6.317,00	Pavimento cerámico	101,44	2.000	202,88
		Mortero de cemento	101,44	1.525	154,69
		Forjado alveolar y ligero "Farlap" (25+5)	2028,75	670	1.359,26
		Aislante Mortero de lana de roca proyectada	38,88	40	1,56
		Placa de "Pladur"	86,86	900	78,17
Suelos	1.527,21	Hormigón	218,70	1.850	404,60
Cubiertas	1.069,00	Grava rodada	534,50	1.450	775,03
		Aislante Poliestireno extrusionado	53,45	38	2,03
		Tela asfáltica	5,35	1.100	5,88
		Mortero formación de pendientes	16,04	900	14,43
		Forjado alveolar y ligero "Farlap" (25+5)	320,70	670	214,87
		Placa de "Pladur"	16,04	900	14,43
			<b>Superficie (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso (t)</b>
Puertas	705,6	Puerta interior de madera	705,6	27,60	19,48
Ventanas	2.427,02	Vidrio doble climalit (resto fachadas)	795,01	27,50	21,86
		Vidrio simple 5 mm (invernadero)	1.412,06	12,50	17,65
		Marco de aluminio (10% superficie vidriada)	219,95	50,70	11,15
<b>PESO TOTAL (t)</b>					<b>4.163,17</b>

Tabla 4.12. Inventario de materiales de la envolvente del edificio n° 1

El peso total de los cerramientos es de 4.163,17 t. Los materiales a base de hormigón, utilizados principalmente en forjados y cubiertas, suponen el mayor peso con un 45% del total, seguidos de la grava colocada sobre cubiertas, que representa un 18,6% del peso total.

El índice de compacidad del edificio nº 1 es de aproximadamente 2 m, y su densidad de materiales es de 0,177 t/m<sup>3</sup>.

#### 4.2.2.1.2. Sistemas energéticos

##### 4.2.2.1.2.1 Calefacción y agua caliente sanitaria

Según consta en el Proyecto de Instalaciones, la parcela 12 tiene instaladas las siguientes calderas para el servicio de calefacción y agua caliente sanitaria de los tres bloques que forman la parcela:

- 1 Caldera de condensación de gas de 327 kW de potencia nominal.
- 2 Calderas de baja temperatura de gas de 342 kW de potencia nominal con un rendimiento de combustión del 92,5%.

Se estima que las cargas correspondientes a la fabricación de las calderas correspondientes al edificio analizado son la tercera parte de la carga de las calderas que hay en la parcela.

##### 4.2.2.1.2.2 Refrigeración

El edificio analizado no dispone actualmente de un sistema activo de refrigeración, a pesar de que sí existe una demanda de refrigeración tal como se verá en el apartado 4.2.2.3.1.1. Por ello, a efectos de cálculo, se considerará que existe un equipo de aire acondicionado centralizado con una potencia nominal de 300 kW y un EER de 1,7.

##### 4.2.2.1.2.3 Sistemas energéticos renovables: energía solar térmica

Según consta en el Proyecto de Instalaciones, el edificio analizado dispone de 24 captadores solares térmicos de placa plana con una superficie total de captación de 45,6 m<sup>2</sup>. La energía obtenida se utiliza exclusivamente como apoyo a la producción de agua caliente sanitaria.

##### 4.2.2.1.2.4 Iluminación

La siguiente tabla presenta la tipología y número de lámparas instaladas en el interior del edificio.

Estancia	Tipo de lámpara	Nº inicial de lámparas instaladas
Dormitorio	Incandescente estándar	390
Aseo-Baños	Halógena	39
Sala de estar	Halógena	252
Pasillo-Recibidor	Halógena	37
Cocina	Fluorescente	76
Escaleras	Halógena	70
Portal	Halógena	27
Sótano-Garaje	Fluorescente	140
Trasteros-Sala Calderas	Halógena	31
TOTAL	-	1.062

Tabla 4.13. Número inicial y tipología de lámparas instaladas en el edificio nº 1

#### 4.2.2.2. Construcción del edificio

##### 4.2.2.2.1. Transporte planta-obra

Las siguientes tablas muestran los cálculos realizados para cuantificar las necesidades de transporte. Como se puede comprobar el transporte de los sistemas energéticos tan solo representa el 0,04% de las necesidades totales, debido a su bajo peso en comparación con los materiales constructivos.

Elemento	Peso total (t)	tkm	%
Cerramientos	4.163,17	416.317,10	83,9
Estructura	798,22	79.822,40	16,1
TOTAL	4.961,39	496.139,50	100

Tabla 4.14. Impacto asociado al transporte de los materiales de construcción en el edificio nº 1

Elemento	Número	Peso unitario (kg)	Peso total (kg)	tkm	%
Calderas Calefacción y ACS	3	400	1.200	40*	18,1
Equipo refrigeración	1	330	330	33	15
Captadores solares térmicos ACS	24	60	1.440	144	65,3
Lámparas iluminación bajo consumo	216	0,05	10,8	1,08	0,5
Lámparas iluminación incandescentes + halógenas	846	0,03	25,38	2,538	1,2
TOTAL			3.006,18	220,62	100

Tabla 4.15. Impacto asociado al transporte de los sistemas energéticos del edificio nº 1.

\*Puesto que las calderas dan servicio a los 3 bloques de la parcela, el impacto en tkm se divide entre 3

##### 4.2.2.2.2. Procesos on-site de construcción

###### 4.2.2.2.2.1 Consumo energético en obra

Sabiendo que el edificio tiene un volumen construido de 23.465 m<sup>3</sup>, se tienen los siguientes consumos:

- Consumo de gasóleo:  $23.465 \text{ m}^3 * 1,39 \text{ kWh/ m}^3 = 32.616 \text{ kWh}$ .
- Consumo eléctrico:  $23.465 \text{ m}^3 * 0,225 \text{ kWh/m}^3 = 5.280 \text{ kWh}$ .

###### 4.2.2.2.2.2 Gestión de Residuos de obra

Las cantidades de residuos de obra generados en la construcción del edificio se muestran en la siguiente tabla.

Descripción del residuo	Residuos	
	Peso (t)	Volumen (m <sup>3</sup> )
Envases que contienen restos de sustancias peligrosas o están contaminados por ellas	0,30	5,87
Gases en recipientes a presión que contienen sustancias peligrosas	0,13	0,53
Hormigón	2,64	1,10
Tejas y materiales cerámicos	-	0,21
Madera	18,25	47,80
Plásticos	6,83	12,06
Tierra y piedras	54,20	40,65
Residuos mezclados de construcción	6,40	12,38
Papel y cartón	2,24	5,44

Tabla 4.16. Cantidades de residuos de obra producidos en el edificio n° 1

#### 4.2.2.3. Uso del edificio

##### 4.2.2.3.1. Operación

###### 4.2.2.3.1.1 Consumo de energía final

Las demandas energéticas de calefacción y refrigeración, obtenidas a partir de la simulación energética del edificio con las aplicaciones *DesignBuilder* y *Lider/Calener VYP*, se presentan en la siguiente tabla, obteniendo resultados similares.

DesignBuilder		Lider / Calener VYP	
Calefacción (kWh/m <sup>2</sup> año)	Refrigeración (kWh/m <sup>2</sup> año)	Calefacción (kWh/m <sup>2</sup> año)	Refrigeración (kWh/m <sup>2</sup> año)
9,12	15,51	11,2	15,1

Tabla 4.17. Demanda de energía para calefacción y refrigeración del edificio n° 1

Según el Proyecto de Instalaciones, en este edificio, el aporte solar térmico es capaz de cubrir, por término medio, el 40% del consumo anual de agua caliente sanitaria.

En lo que respecta al consumo de energía final para iluminación, la siguiente tabla presenta para cada estancia, los valores de iluminancia media mantenida considerados, la superficie de cada estancia, así como la potencia instalada y el consumo de energía final correspondiente. Como se puede comprobar, el consumo de energía final para la iluminación del edificio, incluyendo tanto las viviendas como las zonas comunes, asciende a cerca de 28.000 kWh/año, lo que supone 5,8 kWh/m<sup>2</sup> y año, con un total de casi 1.400 MWh en la vida útil del edificio.



Estancia	Iluminancia media mantenida (lm/m <sup>2</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	Potencia instalada total (W)	Energía Final (kWh/año)
Dormitorio	150	1.872,13	23.401,6	4.270,8
Aseo-Baños	150	390,05	2.574,3	939,6
Sala de estar	300	1.258,04	16.606,1	15.153
Pasillo-Recibidor	100	552,11	2.429,3	443,3
Cocina	150	446,31	1.046	381,8
Escaleras	100	1.042,50	4.587	1.674,3
Portal	200	201	1.768,8	1.936,8
Sótano-Garaje	75	1.645,30	1.928,1	2.815
Trasteros-Sala Calderas	100	463,80	2.040,7	372,4
TOTAL	-	7.871,23	56.381,9	27.987,1

Tabla 4.18. Proceso de cálculo del consumo de energía final para iluminación del edificio n° 1

A modo de resumen, la siguiente tabla muestra todos los consumos de energía final junto con el aporte solar, que se han considerado en el análisis.

	kWh/m <sup>2</sup> año*	kWh/ocupante año	MWh/año	MWh/vida útil
<b>Calefacción</b>	13,4	276,15	64,90	3.244,77
<b>Refrigeración</b>	8,9	183,41	43,10	2.155,11
<b>Agua caliente</b>	10,9	224,63	52,79	2.639,40
<b>Iluminación</b>	5,78	119,09	27,99	1.399,36
<b>SUBTOTAL</b>	38,98	803,29	188,77	9.438,64
<b>Aporte solar térmico</b>	-4,36	-89,85	-21,12	-1.055,76
<b>TOTAL</b>	34,62	713,44	167,66	8.382,88

Tabla 4.19. Consumos de energía final del edificio. \* Se considera la superficie útil climatizada del edificio n° 1

#### 4.2.2.3.1.2 Consumo de agua

Considerando que el edificio analizado es un bloque de viviendas multifamiliar, con 55 viviendas de 3 dormitorios y 5 viviendas de 2 dormitorios, se obtienen los resultados del consumo total de agua que se muestran en la siguiente tabla. Para desagregar la parte del consumo total de agua correspondiente al agua caliente sanitaria se toma como válida una ratio de 22 litros de agua caliente a 60°C por persona y día, ratio exigida por el CTE-DB-HE4 para viviendas multifamiliares.

N° viviendas	N° ocupantes	Consumo unitario de agua (m <sup>3</sup> /vivienda y día)	Consumo total de agua (m <sup>3</sup> /año)	Consumo ACS a 60°C (m <sup>3</sup> /año)
55	4	0,41	8.230,75	1.766,6
5	3	0,38	693,50	120,45
TOTAL			8.924,25	1.887,05

Tabla 4.20. Consumos totales de agua y de ACS del edificio n° 1

#### 4.2.2.3.1.3 Tratamiento de aguas residuales

Puesto que la totalidad (se desprecia el uso en pequeños riegos, etc.) del agua consumida por el edificio termina en desagüe, y por tanto tratada como agua residual, se considera un volumen total de agua a tratar de 8.924,25 m<sup>3</sup>/año.

#### 4.2.2.3.2. Mantenimiento

##### 4.2.2.3.2.1 Reemplazo de materiales de construcción

Para calcular las necesidades de transporte de puertas y ventanas hasta el edificio se estima un peso total de 70,14 t (calculado a partir de la Tabla 4.12).

##### 4.2.2.3.2.2 Reemplazo de sistemas energéticos

El nº de lámparas a reponer se muestra en la siguiente tabla.

Estancia	Tipo de lámpara	Nº de lámparas a reponer
Dormitorio	Incandescente estándar	3.169
Aseo-Baños	Halógena	317
Sala de estar	Halógena	5.488
Pasillo-Recibidor	Halógena	131
Cocina	Fluorescente	98
Escaleras	Halógena	564
Portal	Halógena	707
Sótano-Garaje	Fluorescente	1.140
Trasteros-Sala Calderas	Halógena	110
TOTAL	-	11.724

Tabla 4.21. Número y tipología de lámparas a reponer a lo largo de la vida útil del edificio nº 1

Para estimar el impacto asociado al transporte de los nuevos equipos generadores, captadores solares térmicos y lámparas de iluminación hasta el edificio se consideran unos pesos similares a los indicados en el apartado 4.2.2.2.1.

## 4.3. Edificio residencial nº 2

En este apartado se muestran los datos de entrada considerados en el estudio de ciclo de vida del bloque sur de la Parcela 24 Sector 89/4 de Valdespartera (Zaragoza).

### 4.3.1. Descripción general del edificio

La parcela 24 está compuesta por tres bloques de edificios de similares características que disponen de 2 plantas subterráneas de garaje de uso compartido.



Figura 4.9. Imagen del edificio nº 2 objeto del estudio

El edificio objeto del estudio es el denominado bloque sur. Dicho edificio está compuesto por cinco plantas con una superficie construida total de 8.607,12 m<sup>2</sup> y una superficie útil habitable (climatizada) de 4.458,6 m<sup>2</sup> para un total de 60 viviendas y 230 ocupantes.

Planta	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )
Sótano-garaje -2	1.527,21	2,65	4.047,11
Sótano-garaje -1	1.527,21	3,85	5.879,76
Planta baja	925,45	2,65	2.452,44
Planta primera	925,45	2,5	2.313,62
Planta segunda	925,45	2,5	2.313,62
Planta tercera	925,45	2,5	2.313,62
Planta cuarta	925,45	2,5	2.313,62
Planta quinta	925,45	2,5	2.313,62
TOTAL	8.607,12	-	23.947,41

Tabla 4.22. Definición de las plantas del edificio n° 2

### 4.3.2. Datos de entrada

#### 4.3.2.1. Producción del edificio

##### 4.3.2.1.1. Materiales de construcción

##### 4.3.2.1.1.1 Estructura y cerramientos

Este edificio incorpora una notable variación respecto al edificio n° 1 analizado en el apartado anterior, ya que incorpora 2 plantas subterráneas de aparcamiento, lo que aumenta considerablemente el peso de los muros de contención respecto al global del edificio. En las siguientes tablas se indican las distintas tipologías de pilares existentes en cada una de las plantas de viviendas del edificio, calculando su volumen total.

Dimensiones (mm)	300 x 300	300 x 350	350 x 350
Planta 1	22	13	20
Planta 2	22	13	20
Planta 3	22	13	20
Planta 4	22	13	20
Planta 5	22	13	20
Planta 6	22	13	20

Tabla 4.23. Número de pilares existentes en las distintas plantas de viviendas del edificio n° 2 según las dimensiones de los pilares

Dimensiones (mm)	300 x 300	300 x 350	350 x 350
Área (m <sup>2</sup> )	0,09	0,11	0,12
N° total de pilares	132	78	120
Longitud total (m)	330	195	300
Volumen (m <sup>3</sup> )	30	20	37

Tabla 4.24. Cálculo del volumen total de los pilares de las viviendas del edificio n° 2

Agregando el volumen de cada tipología de pilares se obtiene el volumen total de pilares de viviendas, que asciende a  $87 \text{ m}^3$ . Este valor indica el volumen de espacio total que ocupan los pilares, que debe desagregarse en hormigón y acero.

La siguiente figura muestra la vista en la planta de los 2 sótanos subterráneos comunes a los 3 bloques que conforman la parcela 24 y la posición del edificio objeto de este estudio.

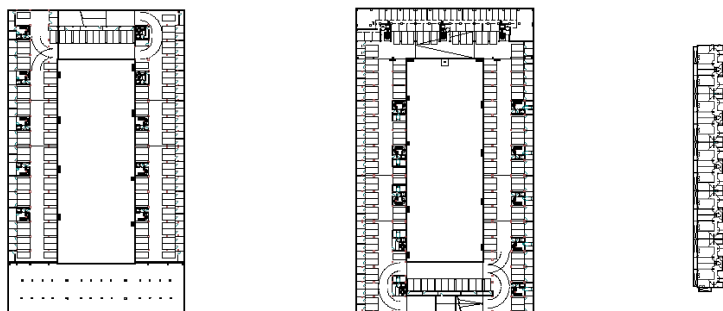


Figura 4.10. Vista general del sótano 1 (izqda.), sótano 2 (centro) y bloque sur de la parcela 24 (dcha.)

El número de pilares para los dos sótanos-aparcamiento, desglosado por cada tipo de pilar, y su volumen total, considerando la altura de cada planta sótano, se indica en las siguientes tablas.

Dimensiones (mm)	300 x 300	300 x 350	350 x 350	400 x 400	400 x 450	450 x 450	450 x 550	450 x 500	550 x 550
Sótano 2	19	0	35	61	42	13	28	2	15
Sótano 1	19	0	35	61	42	13	28	2	15

Tabla 4.25. Número de pilares existentes en los sótanos-aparcamientos del edificio n° 2 según las dimensiones de los pilares

Dimensiones (mm)	300 x 300	300 x 350	350 x 350	400 x 400	400 x 450	450 x 450	450 x 550	450 x 500	550 x 550
Volumen ( $\text{m}^3$ )	10	0	26	59	45	16	42	2,7	27

Tabla 4.26. Cálculo del volumen total de los pilares de las dos plantas de sótano-aparcamientos del edificio n° 2

Agregando el volumen de cada tipología de pilares se obtiene el volumen total de pilares del aparcamiento, que asciende a  $227,7 \text{ m}^3$ . Al realizarse el cálculo de los pilares sobre el total del aparcamiento, para conocer la aportación al bloque analizado en este estudio se divide dicho valor entre 3, quedando un volumen de  $75,9 \text{ m}^3$ .

Puesto que los 3 bloques de la parcela 24 cuentan con 2 aparcamientos subterráneos, se tiene una estructura formada por muros de contención en las partes perimetral y central, tal como se muestra en la siguiente figura.

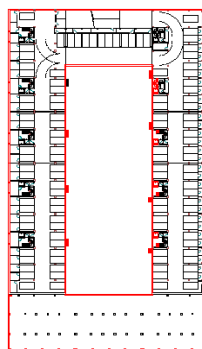


Figura 4.11. Muros de contención de los edificios de la parcela 24 (resaltados en color rojo)

El espesor del muro es de 400 mm, y su altura es de 6.750 mm incluyendo el tacón, tal como muestra la siguiente figura.

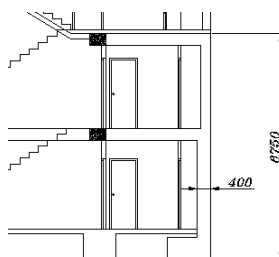


Figura 4.12. Dimensiones de los muros de contención del edificio nº 2

Conociendo la longitud de muro de contención necesaria para la ejecución de los 3 bloques de la parcela, que es de 580 metros lineales y el área de la sección transversal del muro, que es de 2,7 m<sup>2</sup>, se puede calcular el volumen total del muro de contención, que asciende a 1.566 m<sup>3</sup>. Para calcular el volumen de los muros de contención correspondientes al edificio analizado, se divide entre 3 el volumen anterior, quedando un volumen de 522 m<sup>3</sup>.

A modo de resumen, la siguiente tabla muestra la cantidad y tipología de hormigón armado considerado para los pilares y muros de contención de la estructura.

	Volumen (m <sup>3</sup> )	Material	Cantidad de hormigón (t)	Cantidad de acero (t)	Cantidad total (t)
<b>Pilares de viviendas</b>	87	Hormigón armado HA-25, 106 kg/m <sup>3</sup> de acero	199,58	9,22	208,80
<b>Pilares de sótanos-aparcamientos</b>	75,9	Hormigón armado HA-25, 106 kg/m <sup>3</sup> de acero	174,12	8,05	182,16
<b>Muros de contención</b>	522	Hormigón armado HA-25, 150 kg/m <sup>3</sup> de acero	1.174,5	78,30	1252,80
TOTAL			1.548,19	95,57	1.643,76

Tabla 4.27. Inventario de materiales de la estructura del edificio nº 2

La siguiente tabla muestra la superficie total de cada cerramiento del edificio, desglosando el volumen, densidad y peso de los materiales que lo componen. Nótese que el forjado de arlita y el hormigón que aparecen en la tabla forman parte también de la estructura del edificio.

Cerramiento	Superficie (m <sup>2</sup> )	Material	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Peso (t)
Muros exteriores	3.272,54	Aglomerado de corcho	71,43	115	8,21
		Mortero de cal	10,86	1.125	12,22
		Bloque cerámico de arcilla aligerada, espesor: 24 cm	621,78	920	572,04
		Enlucido de yeso	32,73	900	29,45
Muros mäsicos exteriores	706,77	Revestimiento monocapa	4,59	1250	5,74
		Bloque cerámico de arcilla aligerada, espesor: 24 cm	169,62	920	156,06
		Enlucido de yeso	14,14	900	12,72
Tabiques	6.371,50	Enlucido de yeso	509,72	900	458,75
		Ladrillo	892,01	630	561,97
Forjados	7.290	Baldosa de gres	63,18	2.000	126,36
		Mortero de cemento	218,70	1.250	273,38
		Forjado de arlita	2.187,00	1.090	2.383,83
		Enlucido de yeso	145,80	900	131,22
		Forjado tipo "forel"	583,20	1.929	1.124,99
Suelos	1.527,21	Hormigón	229,08	1.850	423,80
Cubiertas	1.069	Forjado de arlita	320,70	1.090	349,56
		Aislante Poliestireno extrusionado	53,45	38	2,03
		Enlucido de yeso	21,38	900	19,24
			<b>Superficie (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso (t)</b>
Puertas	806,40	Puerta interior de madera	806,40	27,60	22,26
Ventanas	2.019,37	Vidrio doble climalit 5-10-6 (resto fachadas)	664,29	27,50	18,27
		Vidrio simple 5 mm (invernadero)	1.153,14	12,50	14,41
		Marco de aluminio (10% superficie vidriada)	201,94	50,70	10,24
<b>PESO TOTAL (t)</b>					<b>6.716,75</b>

Tabla 4.28. Inventario de materiales de la envolvente del edificio n° 2

El peso total de los cerramientos es de 6.716,75 t. Los materiales a base de hormigón utilizados principalmente en forjados y cubiertas suponen el mayor peso, con un 63,8% del total, seguidos de los bloques de arcilla aligerada en muros, que representan un 10,8% del peso total. El índice de compacidad del edificio n° 2 es

similar al del edificio nº 1 (2 m). Sin embargo su densidad de materiales es un 58% mayor ( $0,28 \text{ t/m}^3$ ), debido a la existencia de 1 planta adicional de aparcamiento subterráneo.

#### 4.3.2.1.2. Sistemas energéticos

##### 4.3.2.1.2.1 Calefacción y agua caliente sanitaria

Según consta en el Proyecto de Instalaciones, la parcela 24 tiene instaladas las siguientes calderas para el servicio de calefacción y agua caliente sanitaria de los tres bloques que forman la parcela:

- 1 Caldera de baja temperatura de gas, de 161 kW de potencia nominal, con un rendimiento de combustión del 93,6%.
- 2 Calderas de baja temperatura de gas, de 507 kW de potencia nominal con rendimiento de combustión del 94%.

Se estima que las cargas correspondientes a la fabricación de las calderas correspondientes al edificio analizado es la tercera parte de la carga de las calderas que hay en la parcela.

##### 4.3.2.1.2.2 Refrigeración

El edificio analizado no dispone actualmente de un sistema activo de refrigeración, a pesar de que sí existe una demanda de refrigeración tal como se verá en el apartado 4.3.2.3.1.1. Por ello, al igual que en edificio anterior, se considerará que existe un equipo de aire acondicionado centralizado con una potencia nominal de 300 kW y un EER de 1,7.

##### 4.3.2.1.2.3 Sistemas energéticos renovables: energía solar térmica

Según consta en el Proyecto de Instalaciones, el edificio analizado dispone de 30 captadores solares térmicos de placa plana con una superficie total de captación de  $57 \text{ m}^2$ , que se utilizan exclusivamente como apoyo a la producción de agua caliente sanitaria.

##### 4.3.2.1.2.4 Iluminación

La siguiente tabla presenta la tipología y número de lámparas instaladas en el interior del edificio.

Estancia	Tipo de lámpara	Nº inicial de lámparas instaladas
Dormitorio	Incandescente estándar	409
Aseo-Baños	Halógena	36
Sala de estar	Halógena	223
Pasillo-Recibidor	Halógena	28
Cocina	Fluorescente	91
Escaleras	Halógena	37
Portal	Halógena	32
Sótano-Garaje	Fluorescente	261
Sala Calderas	Halógena	3
TOTAL	-	1.120

Tabla 4.29. Número inicial y tipología de lámparas instaladas en el edificio nº 2

### 4.3.2.2. Construcción del edificio

#### 4.3.2.2.1. Transporte planta-obra

Las siguientes tablas muestran los cálculos realizados para cuantificar las necesidades de transporte. Como se puede comprobar el transporte de los sistemas energéticos tan solo representa el 0,03% de las necesidades totales, debido a su bajo peso en comparación con los materiales constructivos.

Elemento	Peso total (t)	tkm	%
Cerramientos	6.716,75	671.675,27	80,3
Estructura	1.643,76	164.376	19,7
TOTAL	8.360,51	836.051,27	100

Tabla 4.30. Impacto asociado al transporte de los materiales de construcción del edificio n° 2

Elemento	Número	Peso unitario (kg)	Peso total (kg)	tkm	%
Calderas Calefacción y ACS	3	366*	1.098	36,6**	14,4
Equipo refrigeración	1	330	330	33	13
Captadores solares térmicos ACS	30	60	1.800	180	71
Lámparas iluminación bajo consumo	352	0,05	17,6	1,76	0,7
Lámparas iluminación incandescentes + halógenas	768	0,03	23,04	2,30	0,9
TOTAL			3.268,64	253,66	100

Tabla 4.31. Impacto asociado al transporte de los sistemas energéticos del edificio n° 2.  
\*Peso promedio de las 3 calderas existentes. \*\*Puesto que las calderas dan servicio a los 3 bloques de la parcela, el impacto en tkm se divide entre 3

#### 4.3.2.2.2. Procesos on-site de construcción

##### 4.3.2.2.2.1 Consumo energético en obra

Sabiendo que el edificio tiene un volumen construido de 23.947 m<sup>3</sup> se tienen los siguientes consumos:

- Consumo de gasóleo:  $23.947 \text{ m}^3 * 1,39 \text{ kWh/m}^3 = 33.286 \text{ kWh}$ .
- Consumo eléctrico:  $23.947 \text{ m}^3 * 0,225 \text{ kWh/m}^3 = 5.388 \text{ kWh}$ .

##### 4.3.2.2.2.2 Gestión de Residuos de obra

Las cantidades de residuos de obra generados en la construcción del edificio se muestran en la siguiente tabla.



Descripción del residuo	Residuos	
	Peso (t)	Volumen (m <sup>3</sup> )
Envases que contienen restos de sustancias peligrosas o están contaminados por ellas	0,34	6,76
Gases en recipientes a presión que contienen sustancias peligrosas	0,15	0,61
Hormigón	3,04	1,1
Tejas y materiales cerámicos	-	0,25
Madera	21,01	55,04
Plásticos	7,86	13,88
Tierra y piedras	62,41	46,81
Residuos mezclados de construcción	7,37	14,25
Papel y cartón	2,58	6,27

Tabla 4.32. Cantidades de residuos de obra producidos en el edificio n° 2

### 4.3.2.3. Uso del edificio

#### 4.3.2.3.1. Operación

##### 4.3.2.3.1.1 Consumo de energía final

La siguiente tabla presenta las demandas energéticas de calefacción y refrigeración, obtenidas a partir de la simulación energética del edificio con las aplicaciones *DesignBuilder* y *Lider/Calener VYP*, obteniendo resultados similares.

DesignBuilder		Lider / Calener VYP	
Calefacción (kWh/m <sup>2</sup> año)	Refrigeración (kWh/m <sup>2</sup> año)	Calefacción (kWh/m <sup>2</sup> año)	Refrigeración (kWh/m <sup>2</sup> año)
11,21	12,25	12,7	11,9

Tabla 4.33. Demanda de energía para calefacción y refrigeración del edificio n° 2

Según el Proyecto de Instalaciones, en este edificio, el aporte solar térmico es capaz de cubrir, por término medio, el 50% del consumo anual de agua caliente sanitaria.

La siguiente tabla presenta para cada estancia, los principales valores utilizados para el cálculo del consumo de energía final para iluminación del edificio, que asciende a 28.064 kWh/año, lo que supone 6,3 kWh/m<sup>2</sup> y año, con un total de aproximadamente 1.400 MWh en la vida útil del edificio.

Estancia	Iluminancia media mantenida (lm/m <sup>2</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	Potencia instalada total (W)	Energía Final (kWh/año)
Dormitorio	150	1.963,6	24.545	4.479,5
Aseo-Baños	150	363,1	2.396,2	874,6
Sala de estar	300	1.117,4	14.749	13.458,5
Pasillo-Recibidor	100	419,4	1.845,3	336,8
Cocina	150	531,4	1.245,4	454,6
Escaleras	100	562,4	2.474,3	903,1
Portal	200	236,9	2.084,3	2.282,3
Sótano-Garaje	75	3.064,0	3.590,6	5.242,3
Sala Calderas	100	40,7	179,1	32,7
TOTAL	-	8.298,7	53.109,2	28.064,3

Tabla 4.34. Proceso de cálculo del consumo de energía final para iluminación del edificio n° 2

A modo de resumen, la siguiente tabla muestra todos los consumos de energía final que se han considerado en el análisis.

	kWh/m <sup>2</sup> año*	kWh/ocupante año	MWh/año	MWh/vida útil
<b>Calefacción</b>	14,60	283,02	65,10	3.254,78
<b>Refrigeración</b>	7,00	135,70	31,21	1.560,51
<b>Agua caliente</b>	8,40	162,84	37,45	1.872,61
<b>Iluminación</b>	6,29	122,02	28,06	1.403,22
<b>SUBTOTAL</b>	36,29	703,58	161,82	8.091,12
<b>Aporte solar térmico</b>	-4,20	-81,42	-18,73	-936,31
<b>TOTAL</b>	32,09	622,16	143,10	7.154,81

Tabla 4.35. Consumos de energía final del edificio. \* Se considera la superficie útil climatizada del edificio n° 2

#### 4.3.2.3.1.2 Consumo de agua

Considerando que el edificio analizado es un bloque de viviendas multifamiliar, con 50 viviendas de 3 dormitorios y 10 viviendas de 2 dormitorios, se obtienen los resultados del consumo total de agua que se muestran en la siguiente tabla. Para desagregar la parte del consumo de agua total correspondiente al agua caliente sanitaria se vuelve a considerar la ratio de 22 litros de agua caliente a 60°C por persona y día.

N° Viviendas	Ocupantes	Consumo unitario (m <sup>3</sup> /vivienda y día)	Consumo total: (m <sup>3</sup> /año)	ACS (60°C) (m <sup>3</sup> /año)
50	4	0,41	7.482,5	1.606
10	3	0,38	1.387	240,9
TOTAL			8.869,5	1.846,9

Tabla 4.36. Consumos totales de agua y de ACS del edificio n° 2

#### 4.3.2.3.1.3 Tratamiento de aguas residuales

Del mismo modo que se hizo en el edificio nº 1, se considera un volumen total de agua a tratar igual al agua consumida en el edificio: 8.869,5 m<sup>3</sup>/año.

#### 4.3.2.3.2.Mantenimiento

##### 4.3.2.3.2.1 Reemplazo de materiales de construcción

Para calcular las necesidades de transporte de puertas y ventanas hasta el edificio se estima un peso total de 65,177 t (calculado a partir de la Tabla 4.28).

##### 4.3.2.3.2.2 Reemplazo de sistemas energéticos

El nº de lámparas a reponer se muestra en la siguiente tabla.

Estancia	Tipo de lámpara	Nº de lámparas a reponer
Dormitorio	Incandescente estándar	3.324
Aseo-Baños	Halógena	295
Sala de estar	Halógena	4.875
Pasillo-Recibidor	Halógena	100
Cocina	Fluorescente	116
Escaleras	Halógena	305
Portal	Halógena	833
Sótano-Garaje	Fluorescente	2.122
Trasteros-Sala Calderas	Halógena	9
TOTAL	-	11.979

Tabla 4.37. Número y tipología de lámparas a reponer a lo largo de la vida útil del edificio nº2

Para estimar el impacto asociado al transporte de los nuevos equipos generadores, captadores solares térmicos y lámparas de iluminación hasta el edificio se consideran unos pesos similares a los indicados en el apartado 4.3.2.2.1.

## 4.4. Edificio de oficinas/I+D

En este apartado se presentan los datos de entrada considerados en el estudio de ciclo de vida del edificio CIRCE de la Universidad de Zaragoza.

### 4.4.1.Descripción general del edificio

El Edificio CIRCE está ubicado en el Campus Río Ebro de la Universidad de Zaragoza. Su ejecución se enmarca dentro del Plan de Infraestructuras 2006-2012 de I+D de la Universidad de Zaragoza, a través de la financiación concedida en la convocatoria de Infraestructura Científico-Tecnológica (2003-2004) de fondos FEDER y cofinanciado por el Gobierno de Aragón. Su presupuesto total asciende a 2.400.000 Euros. El proyecto del edificio ha sido elaborado por el equipo de arquitectos dirigido por Petra Jebens – Zirkel. La primera piedra fue colocada en abril de 2007 y el edificio se finalizó en octubre de 2009.

El Edificio CIRCE pretende ser un edificio singular y ejemplar: un “modelo” de bioconstrucción y sostenibilidad y un “portal” de los últimos avances tecnológicos en materia de ecoeficiencia.

El propio edificio constituye en sí mismo un proyecto de I+D+i con el que se pretende establecer las bases científico-tecnológicas para el desarrollo de Edificios de Cero Emisiones de Ciclo de Vida (*LC-ZEB*), integrando técnicas avanzadas de bioconstrucción, ahorro energético, agua y materiales, y energías renovables, obteniendo la máxima eficiencia de los recursos disponibles, sin disminuir el confort térmico.



*Figura 4.13. Vista general del edificio CIRCE*

A través de este proyecto se pretende balancear a cero las emisiones asociadas a la construcción, uso, mantenimiento y disposición final del edificio en toda su vida útil, y no sólo en la etapa de uso, tal como se hace en los *Zero Emission Building* convencionales.

Asimismo se persigue difundir y promover la ecoeficiencia en la edificación, potenciando el desarrollo de sistemas de eficiencia energética y de energías renovables integrados en edificios. Se busca, por tanto, ejercer una acción ejemplarizante, a partir de la cual obtener un efecto multiplicador, propiciando el desarrollo de una nueva gama de edificios de cero emisiones.

La edificación se ubica sobre una parcela con una superficie de 4.357 m<sup>2</sup> y ocupa 1.381 m<sup>2</sup> en planta baja, el volumen total edificado es de 9.550 m<sup>3</sup>. El edificio consta de 1.743 m<sup>2</sup> útiles con una superficie construida total de 1.990 m<sup>2</sup>.



*Figura 4.14. Sección del edificio CIRCE*

El edificio se proyecta con forma compacta y dividido en dos plantas. En el edificio se aprecian claramente tres elementos: el núcleo redondo con la cúpula, los despachos agrupados a su alrededor y los laboratorios. Los laboratorios constituyen una nave rectangular a 36 grados sobre el eje este-oeste, que actúa como barrera contra el viento predominante (cierzo). De este modo se evitan los considerables descensos de temperatura no deseados en los meses fríos. Por otra parte existe una

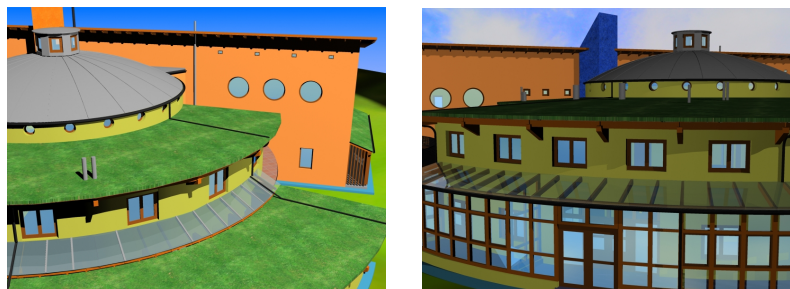
chimenea solar capaz de aprovechar estos vientos dominantes para refrigerar el edificio de forma natural durante los meses de verano.

La edificación se ha realizado siguiendo las normas de la bioconstrucción, utilizando materiales ecoeficientes, como corcho natural, madera, piedra natural, mortero de cal y pinturas naturales al silicato, que no contienen elementos nocivos ni tóxicos y proporcionan una mayor transpirabilidad al edificio.

La estructura vertical está compuesta por muros de carga de diferentes espesores, que se apoyan sobre una losa de cimentación de hormigón armado sobre las zahorras compactadas, lámina de polipropileno con nódulos con geotextil como impermeabilizante y protección. La inclusión de dicha losa fue necesaria debido a las malas propiedades del terreno, derivadas de su proximidad al río Ebro. Los muros principales exteriores son de dos caras: la cara exterior de bloques de arcilla aligerada de 29 cm reforzado con armadura en el tendel y la interior de ladrillo agujereado de un pie, ambas unidas con grapas de unión de acero inoxidable, lo que proporciona una elevada inercia térmica al edificio.

Por su parte, la estructura horizontal está formada, en la parte principal, por forjados y cubiertas de vigas de madera laminada, apoyados en zunchos de hormigón como coronación de los muros de carga.

Las cubiertas del edificio se proyectan con sistemas de ajardinamiento conformando un biotopo de plantas autóctonas de la zona resistentes a las características climatológicas y con una mínima necesidad de riego. Las cubiertas vegetales constituyen una opción ecológica y económica muy ventajosa: compensan la ocupación de superficies libres, generan oxígeno, actúan de aislamiento térmico y acústico, favorecen la absorción de partículas de polución y suciedad, se evita el recalentamiento en verano, y reducen las oscilaciones extremas de temperaturas y la humedad.



*Figura 4.15. Detalle de las cubiertas vegetales e invernadero*

Existe un invernadero en planta baja, que va adosado a la fachada curvada del sur, con el techo acristalado y construido con postes y vigas de madera de pino laminada, apoyadas encima de un murete de ladrillo agujereado. Este invernadero tiene importancia no solo para el soleamiento de las estancias adyacentes durante los meses fríos, sino que además funciona como calefacción en invierno, incluso durante las horas sin sol, debido a la acumulación de calor en la masa de elevada inercia térmica de paredes y suelo. Dispone de elementos móviles, pudiéndose abrir todas las ventanas verticales de la parte central, y existen toldos practicables exteriormente encima del techo. De este modo, en verano se crea un porche en sombra, con ventilación, que protege el interior del exceso del calor y sirve para

refrescar los recintos adosados. El acristalamiento del invernadero es a base de cristal simple en los cerramientos verticales.

El acristalamiento exterior en puertas y ventanas es de doble vidrio con cámara de aire de 16 mm. Todos son de baja emisividad, con una transmisión luminosa alta y un factor solar reducido.

El aislamiento se ha optimizado para cada una de las zonas térmicas, dependiendo de su grado de exposición al exterior y de la diferente utilización de los espacios de accesos, zonas de paso, laboratorios u oficinas, y se ha estudiado la correcta ubicación de la masa térmica de inercia. Se utiliza corcho natural en planchas y en forma granular, mezcla con arcilla expandida y manta de fibra de cáñamo. El espesor de corcho en los muros es de 2-3 cm, dependiendo de la zona.

Toda la carpintería de ventanas y puertas exteriores se ha realizado con madera de alerce certificada. Las ventanas y puertas interiores son de madera de pino y abeto. Como pavimentación general de los despachos y pasillos se utiliza el linóleo natural, elaborado a partir de aceite de linaza y corcho, mientras que en los invernaderos y en las entradas principales de planta baja se ha colocado piedra natural oscura del municipio de Calatorao (Zaragoza).

Alrededor del edificio se configuran cuatro plazas, envolviendo el edificio. Se proyectan como símbolos de los elementos básicos de la naturaleza: plaza del sol (elemento fuego), plaza del agua (elemento agua), plaza de la biomasa (elemento tierra), plaza del viento (elemento aire). Todas las zonas exteriores de la parcela se han adecuado eligiendo especies autóctonas para asegurar su adaptación total, minimizar el aporte de agua de riego y las operaciones de mantenimiento.



*Figura 4.16. Entorno del edificio CIRCE*

En el edificio se integran un buen número de tecnologías y equipamientos energéticos innovadores. Entre las técnicas que se utilizan para la calefacción del edificio cabe destacar el invernadero como sistema de calentamiento solar pasivo, la caldera de condensación de alto rendimiento, y el sistema de distribución de calor de baja temperatura (suelo radiante) con control independiente en cada despacho mediante termostato. En cuanto a la refrigeración se dispone de un sistema pasivo de enfriamiento compuesto por una torre de refrigeración solar. Además existe una bomba de calor con aprovechamiento de energía geotérmica por medio de un panel situado a un metro bajo tierra cuya temperatura se mantiene prácticamente constante a lo largo de todo el año, permitiendo extraer el frío o el calor del edificio, proporcionando agua caliente o fría al sistema de distribución de suelo radiante. Por su parte, el sistema de iluminación está compuesto por lámparas

de alta eficiencia (tubos fluorescentes y lámparas fluorescentes compactas) y detectores de presencia en pasillos y algunas estancias.

A lo largo del primer año de funcionamiento está prevista la incorporación de un sistema solar térmico de tubos de vacío con caldera de biomasa que funcione como apoyo a la calefacción y a la refrigeración por medio de una máquina de absorción. Asimismo se prevé la instalación de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico de pequeña potencia conectado a la red del edificio.

#### 4.4.2. Datos de entrada

##### 4.4.2.1. Producción del edificio

##### 4.4.2.1.1. Materiales de construcción

##### 4.4.2.1.1.1 Estructura y Cerramientos

En la siguiente tabla se desglosan todos los materiales que forman parte de la estructura y cerramientos del edificio, indicando su volumen, densidad y peso. El peso total de los materiales es de 14.141,73 t. Las zehorras suponen el 73,7% del peso, el hormigón el 14,3%, los ladrillos el 3,4% y los bloques de arcilla aligerada el 2,4%.

Tipo de material	Material	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Peso (t)
Hormigones	Hormigón armado	1.026,33	1.700	1.744,76
	Hormigón sin armadura	175,41	1.525	272,11
	Cemento	-	-	127,93
	Cal	-	-	71,99
	Zehorras	5.421,16	-	10.427,60
	Mortero adhesivo	0,96	1.250	1,20
	Mortero de cal	130,73	1.250	163,42
	Mortero de cemento	0,01	1.250	0,013
	Arlita	70,70	538	38,04
Aislantes	Fibras de polipropileno	-	-	0,044
	Corcho granulado	-	-	24,99
	Placa de corcho aglomerado	44,39	115	5,11
	Filtro de cáñamo	42,28	50	2,11
Metales	Arcilla expandida Arlita	414,53	538	223,02
	Chapa de zinc	0,66	7.200	4,74
	Acero reforzado	-	-	69,67
	Acero laminado	-	-	8,67
	Acero tubos	-	-	0,70
Maderas	Puntas de acero	-	-	0,83
	Panel OSB	21,90	600	13,14
	Madera de pino	30,39	570	17,32
Cerramientos	Madera laminada interior	116,97	550	64,33
	Paneles de yeso	3,51	900	3,41
	Baldosa cerámica	5,30	2.000	10,60

Tipo de material	Material	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Peso (t)
Cerramientos	Piedra caliza	2,80	1.895	5,30
	Linóleo natural	1,70	1.200	2,04
	EPDM	2,83	1.150	3,26
	Filtro geotextil	-	-	0,941
	Papel protección	-	-	0,079
	Ladrillo agujereado	339,93	1.220	414,71
	Ladrillo hueco	73,23	920	67,37
	Bloque arcilla aligerada	365,93	910	332,99
		Superficie (m <sup>2</sup> )	Densidad (kg/m <sup>2</sup> )	Peso (t)
Ventanas y Puertas	Marco de madera ventanas (20% superficie vidriada, salvo invernadero: 30% superficie)	60,31	80,20	4,84
	Vidrio simple (incluye vidrios 6+6 sin cámara en invernadero)	150,31	12,50	1,88
	Vidrio doble	109,21	27,50	3,00
	Puertas de madera	121,11	27,60	3,34
	Puertas de madera-vidrio	45,47	36,50	1,66
	Puertas de acero	42,30	62	2,62
	Puertas de acero-vidrio	33,14	58	1,92
PESO TOTAL (t)				14.141,73

Tabla 4.38. Inventario de materiales de construcción de la estructura y cerramientos del edificio CIRCE

Eliminando el peso de las zehorras y el hormigón armado, impuestos por las malas condiciones geotécnicas del terreno, el peso total de los materiales es de 1.969,37 t, por lo que su densidad sería de 0,206 t/m<sup>3</sup>, un 16% mayor que la del edificio nº 1, debido a la mayor cantidad de materiales requeridos para un edificio de alta inercia térmica como el edificio CIRCE, pero un 26% inferior a la del edificio nº 2.

#### 4.4.2.1.2. Sistemas energéticos

##### 4.4.2.1.2.1 Calefacción y agua caliente sanitaria

Según consta en el Proyecto de Instalaciones, el edificio CIRCE tiene instalados los siguientes equipos para el servicio de calefacción y agua caliente sanitaria:

- 1 caldera de condensación de gas, de 160 kW de potencia nominal para calefacción, con un rendimiento de combustión del 98%.
- 2 depósitos acumuladores eléctrico de 4 kW de potencia nominal para agua caliente sanitaria, con un volumen de 80 litros.
- 1 bomba de calor agua-agua de tipo geotérmico de 66,4 kW de capacidad nominal de calefacción, que funciona mediante compresor eléctrico, con un rendimiento de 4,5.



#### 4.4.2.1.2.2 Refrigeración

La bomba de calor anterior se utiliza también como sistema activo de refrigeración con una capacidad nominal de refrigeración de 54,8 kW.

#### 4.4.2.1.2.3 Sistemas energéticos renovables

En este apartado se indican los sistemas de aprovechamiento de fuentes renovables que se integrarán en el primer año de vida útil del edificio.

Se dispone de un total de 55 de módulos fotovoltaicos de distintas tecnologías, desde sistemas de captación de silicio amorfo hasta sistemas CIS de cobre, indio y selenio. En la siguiente tabla se muestran los tipos de módulos a integrar en el edificio y sus especificaciones técnicas.

Fabricante	Modelo	Tecnología	Potencia unitaria (Wp)	Voc (V)	Isc (A)	Superficie unitaria (m <sup>2</sup> )	Rendimiento (%)	Unidades	Potencia total (kWp)
Wurth	WS 11007/75	CIS	75	22	5,19	0,73	10,56	10	0,75
Kanela	GEA 60	Silicio amorfo	60	91,8	1,19	0,95	6,39	12	0,72
Solarfun	120-18	Policristalino	120	22	7,37	1,01	15	8	0,96
Solarfun	080-18	Mono-cristalino	80	21,8	5	0,67	15,9	8	0,64
Solarwind	MSW 100/40	Bifacial mono-cristalino	140	25	5,5	0,89	15	10	1,4
Unisolar	ES-124	Silicio amorfo, triple capa	124	42	5,1	1,95	6,36	7	0,87
TOTAL								55	5,34

Tabla 4.39. Tipos de módulos fotovoltaicos a integrar en el edificio CIRCE

Se cuenta con 4 captadores solares térmicos de tubos de vacío, Vitosol 200, de 3 m<sup>2</sup> de superficie útil, que servirán de apoyo para cubrir la demanda de calefacción del edificio. Cada captador dispone de 30 tubos de vacío y su ecuación de rendimiento linealizada es:  $0,74 - 1,06 \times (t_m - t_a)/I$ , lo que conlleva un rendimiento máximo del 74% y un coeficiente lineal de pérdidas de 1,06 W/m<sup>2</sup>K.

Para el aprovechamiento del recurso eólico se dispone de un aerogenerador, marca Bornay modelo Inclín 6.000, de 6 kW de potencia nominal. Su rotor está formado por 3 hélices de fibra de vidrio/carbono de 4 m de diámetro. El generador eléctrico es un alternador trifásico de imanes permanentes de neodimio.

#### 4.4.2.1.2.4 Iluminación

La siguiente tabla presenta la tipología y número de lámparas instaladas en el interior del edificio.

		Potencia (W)	Nº inicial de lámparas instaladas
PLANTA BAJA	Columna de tubos fluorescentes 12x 58W	2.505,6	43
	Aplique pared lámpara compacta 26 W	1.300	50
	Lámpara compacta techo 2x26 W	1.768	68
	Lámpara incandescente techo 60 W	1.560	26
	Pantalla fluorescente 2x36 W	10.368	288
	Pantalla fluorescente estancia 2x36 W	1.166,4	32
	Pantalla fluorescente estancia 2x58 W	10.440	180
	Emergencias planta baja	150	3
	TOTAL PLANTA BAJA	29.258	690
PLANTA PRIMERA	Lámpara compacta techo 2x26 W	520	20
	Lámpara incandescente techo 60 W	720	12
	Pantalla fluorescente 2x36 W	8.553,6	238
	Pantalla fluorescente estancia 2x58 W	1.252,8	22
	Pantalla fluorescente estancia 2x36 W	388,8	11
	Lámparas colgantes techo 100W (20)	2000	20
	Emergencias planta primera	300	6
	TOTAL PLANTA PRIMERA	13.753,2	329
	POTENCIA TOTAL	43.011,2	1.019

Tabla 4.40. Potencia instalada en iluminación, número inicial y tipología de lámparas instaladas en el edificio CIRCE

#### 4.4.2.2. Construcción del edificio

##### 4.4.2.2.1. Transporte planta-obra

Las siguientes tablas muestran los cálculos realizados para cuantificar las necesidades de transporte. En este caso, se supone que el elemento de más peso (zahorras) se traslada desde un radio de 15 km. Como se puede comprobar el transporte de los sistemas energéticos tan solo representa el 0,05% de las necesidades totales, debido a su bajo peso en comparación con los materiales constructivos.

Elemento	Peso total (t)	tkm
Cerramientos y Estructura	14.141,73	527.826,84

Tabla 4.41. Impacto asociado al transporte de los materiales de construcción del edificio CIRCE

Elemento	Número	Peso unitario (kg)	Peso total (kg)	tkm	%
Caldera Calefacción	1	300	300	30	12,1
Acumulador eléctrico ACS	2	100	200	20	8,1
Equipo refrigeración	1	60,5	60,5	6,05	2,4
Módulos fotovoltaicos	55	20	1.100	110	44,5
Captadores solares térmicos ACS	4	90	360	36	14,6
Aerogenerador + torre	1	399,8	399,8	39,98	16,2
Lámparas iluminación bajo consumo	1.019	0,05	50,95	5,095	2,1
	TOTAL		2.371,25	247,13	100

Tabla 4.42. Impacto asociado al transporte de los sistemas energéticos del edificio CIRCE

#### 4.4.2.2. Procesos on-site de construcción

##### 4.4.2.2.1 Consumo energético en obra

Sabiendo que el edificio tiene un volumen construido de 9.550 m<sup>3</sup>, se tienen los siguientes consumos:

- Consumo de gasóleo:  $9.550 \text{ m}^3 * 1,39 \text{ kWh/m}^3 = 13.275 \text{ kWh}$ .
- Consumo eléctrico:  $9.550 \text{ m}^3 * 0,225 \text{ kWh/m}^3 = 2.149 \text{ kWh}$ .

Además, en este caso, se han podido obtener los datos correspondientes al movimiento de tierras necesario para realizar la obra a partir del presupuesto incluido en el Proyecto de obra. La siguiente tabla presenta el volumen de tierras movido, desglosado según partidas.

Concepto	Volumen (m <sup>3</sup> )
Desbroce y limpieza del terreno	2.185,75
Excavación a cielo abierto (edificio+talud)	2.372,98
Excavación en zanjas de saneamiento	98,15
Excavación en arquetas o pozos de saneamiento:	24,77
Excavación en pozos en terrenos compactos:	14,47
Excavación en pozos	0,62
TOTAL	4.696,74

Tabla 4.43. Movimientos de tierras desagregados por partidas

##### 4.4.2.2.2 Gestión de Residuos de obra

Las cantidades de residuos de obra generados en la construcción del edificio se muestran en la siguiente tabla.

Descripción del residuo	Peso (t)
Envases que contienen restos de sustancias peligrosas o están contaminados por ellas	0,16
Gases en recipientes a presión que contienen sustancias peligrosas	0,07
Hormigón	1,45
Tejas y materiales cerámicos	-
Madera	9,98
Plásticos	3,74
Residuos mezclados de construcción	3,50
Papel y cartón	1,23

Tabla 4.44. Cantidades de residuos de obra producidas en el edificio CIRCE

A las cifras anteriores hay que añadir que, en esta obra, del volumen total de tierras movido (indicado en el apartado 4.4.2.2.1), la empresa constructora se llevó fuera de obra un total de 3.352 m<sup>3</sup> (el resto se quedó en parcela). Ante la falta de datos al respecto, se supone su traslado mediante camión a otra obra para su aprovechamiento en un radio de 15 km.

### 4.4.2.3. Uso del edificio

#### 4.4.2.3.1. Operación

##### 4.4.2.3.1.1 Consumo de energía final

La siguiente tabla muestra las demandas de calefacción y refrigeración del edificio CIRCE, calculadas por medio de la aplicación *Lider*.

Lider	
Calefacción (kWh/m <sup>2</sup> año)	Refrigeración (kWh/m <sup>2</sup> año)
38,5	11,8

Tabla 4.45. Demanda de energía para calefacción y refrigeración del edificio CIRCE

El consumo de energía final asociado a bombas, ventiladores y auxiliares proporcionado por la aplicación *Calener GT* se ha agregado a los consumos de calefacción y refrigeración obtenidos, con el siguiente reparto: calefacción (67%) y refrigeración (33%).

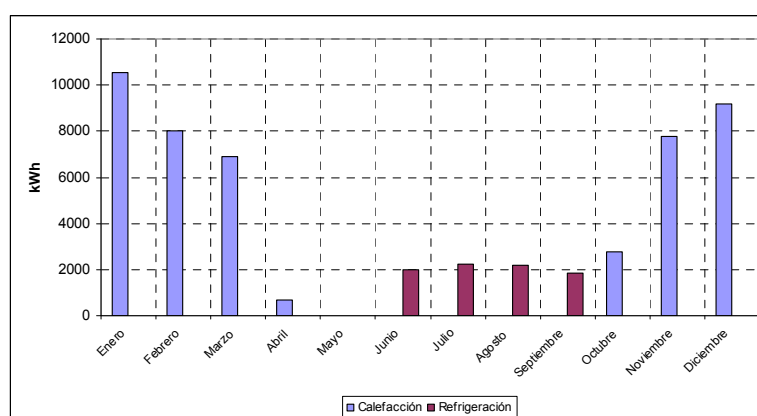


Figura 4.17. Distribución mensual de los consumos de energía final para calefacción y refrigeración (incluyendo los consumos de bombas, ventiladores y auxiliares)

A modo de resumen, la siguiente tabla muestra todos los consumos de energía final obtenidos con *Calener GT*, que se han considerado en el análisis. En cuanto al tipo de fuente energética, el consumo de gas natural para la caldera de calefacción supone el 44% del consumo de energía final, correspondiendo el 56% restante a consumo de electricidad.

	kWh/m <sup>2</sup> año*	kWh/ocupante año	MWh/año	MWh/vida útil
<b>Calefacción</b>	27,33	736,36	47,86	2.393,19
<b>Refrigeración</b>	4,38	118,09	7,68	383,81
<b>Agua caliente</b>	0,09	2,35	0,15	7,64
<b>Iluminación</b>	13,78	371,21	24,13	1.206,44
<b>TOTAL</b>	45,58	1.288,02	79,82	3.991,06

Tabla 4.46. Consumos de energía final del edificio CIRCE. \* Se considera la superficie útil del edificio

Para testear los resultados obtenidos en *Calener GT* referentes al consumo de energía final para calefacción y refrigeración, éstos han sido calculados también a través de la aplicación comercial *TSB13*, herramienta desarrollada por el *Danish Building Institute* (Johnsen K., Grau K., 1994) orientada al análisis energético de los edificios. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

TSB13		Calener GT	
Calefacción kWh/m <sup>2</sup> año	Refrigeración kWh/m <sup>2</sup> año	Calefacción kWh/m <sup>2</sup> año	Refrigeración kWh/m <sup>2</sup> año
27,92	7,51	27,33	4,38

Tabla 4.47. Consumo de energía final para calefacción y refrigeración del edificio CIRCE

En los consumos anteriores, a diferencia de lo que sucedía en los edificios residenciales, las cargas internas juegan un papel importante. Para su evaluación, se ha considerado una ganancia por ocupación de 75 W/persona de calor sensible y de 55 W/persona de calor latente -correspondiente a un trabajo típico de oficina-, una ganancia de calor sensible de 15 W/m<sup>2</sup> debida al funcionamiento de los ordenadores y otros equipos, y de 12 W/m<sup>2</sup> debida al funcionamiento de la iluminación interior (ASHRAE, 1989). Con todo ello, un despacho típico de 20 m<sup>2</sup> para 2 personas, tendrá una ganancia de 690 W de calor sensible y de 110 W de calor latente durante 8-10 horas/día. No obstante, las cargas internas más elevadas se producen en el cuarto de los servidores informáticos, que totalizan una carga de 3.140 W que además se mantiene durante las 24 horas del día. Además, su sistema de refrigeración es por aire, en vez de por agua (cuyo coste inicial es aproximadamente el doble), lo que aumenta la ineficiencia y dificulta el aprovechamiento de ese calor generado para otros usos, como por ejemplo, la calefacción.

#### 4.4.2.3.1.2 Aporte de sistemas energéticos renovables

##### Energía solar fotovoltaica

En la instalación de los módulos existe la posibilidad de realizar el montaje con un ángulo de inclinación de 30° mediante estructuras o de manera horizontal. Los cálculos realizados se han hecho para ambas opciones, utilizando el software *PvSyst 4.37*; obteniendo los siguientes resultados de producción específica en kWh/kWp.

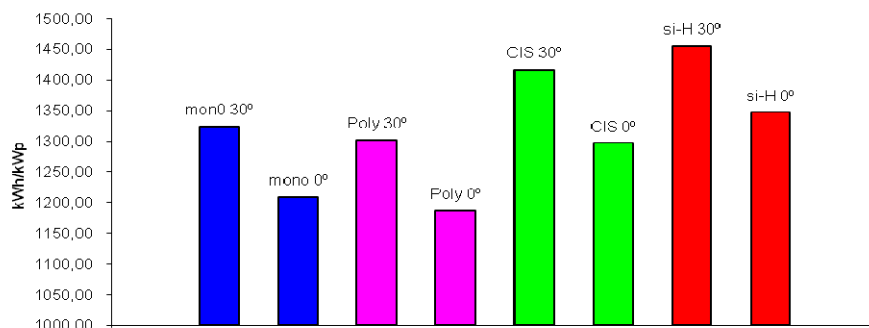


Figura 4.18. Producción específica de los distintos módulos fotovoltaicos para una inclinación de 0° y 30°

Para decidir el ángulo de inclinación de los módulos fotovoltaicos, se opta por la opción (30°) que conlleva una máxima producción específica (kWh/kWp), para tener así una mayor contribución de energía y un mejor “*energy payback time*” de la instalación.

La siguiente tabla presenta los resultados de producción eléctrica obtenidos para cada uno de los módulos fotovoltaicos. Como se puede comprobar, la producción total anual asciende a 7.322,46 kWh/año, lo que permite cubrir el 16,52 % del consumo eléctrico del edificio.

Fabricante	Modelo	Tecnología	Producción (kWh/kWp)	Potencia total (kWp)	Producción (kWh/año)
Wurth	WS 11007/75	CIS	1.416	0,75	1.062
Kaneka	GEA 60	Silicio amorfo	1.455	0,72	1.047,6
Solarfun	120-18	Policristalino	1.301	0,96	1.248,96
Solarfun	080-18	Mono-cristalino	1.324	0,64	847,36
Solarwind	MSW 100/40	Bifacial mono-cristalino	1.324	1,4	1.853,6
Unisolar	ES-124	Silicio amorfo, triple capa	1.455	0,868	1.262,94
TOTAL					7.322,46

Tabla 4.48. Producción anual de energía eléctrica mediante módulos fotovoltaicos

#### Energía solar térmica

Puesto que el sistema solar térmico contribuye únicamente al consumo de calefacción, su periodo de uso está comprendido entre los meses de octubre y abril, por lo que en el periodo de verano no existe aportación alguna sobre el consumo. En esta época del año, para evitar las posibles averías provocadas por los sobrecalentamientos, se vaciará el circuito primario del sistema solar.

Aplicando la metodología *f-chart*, se deduce que con los 4 captadores de tubos de vacío se podría cubrir el 10,48% del consumo de calefacción del edificio, obteniendo un ahorro energético de 3.702 kWh térmicos/año. En la siguiente gráfica se muestra la producción energética mensual de los captadores solares térmicos.

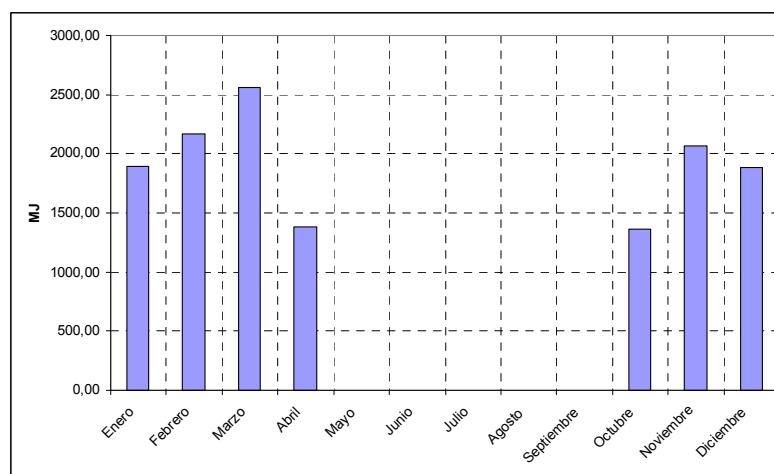


Figura 4.19. Aporte solar térmico mensual para calefacción del edificio

*Energía eólica*

La figura siguiente muestra la curva de potencia del aerogenerador a instalar en el edificio.

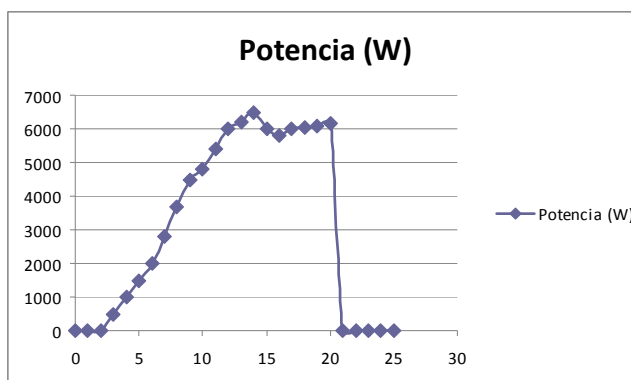


Figura 4.20. Curva de potencia del aerogenerador Inclín 6.000

Puesto que el aerogenerador estará montado en una torre a una altura de 20 metros, no se extrapolan los valores de velocidad de viento (Tabla 4.4) mediante la ley de potencia, ya que no se conocen con precisión los valores de rugosidad del terreno, y, por tanto, es más fiable considerar los valores de velocidad a 23 metros en el cálculo.

La siguiente tabla presenta los valores de producción anual desagregados para las distintas velocidades del viento.

Velocidad viento (m/s)	Producción (kWh)	Velocidad viento (m/s)	Producción (kWh)
0	0	13	499,24
1	0	14	314,32
2	0	15	166,05
3	483,85	16	87,92
4	906,15	17	48,04
5	1.226,48	18	25,01
6	1.425,67	19	13
7	1.677,59	20	6,96
8	1.788,86	21	0
9	1.678,61	22	0
10	1.316,65	23	0
11	1.036,03	24	0
12	765,08	25	0

Tabla 4.49. Producción anual de energía eléctrica del aerogenerador

Agregando los valores de producción obtenidos para cada velocidad de viento se obtiene la producción eléctrica anual, que asciende a 13.465 kWh/año, lo que permite cubrir el 30,37 % del consumo eléctrico del edificio. El número total de horas equivalentes del aerogenerador (suponiendo una disponibilidad total) es de 2.244 h/año, considerado muy adecuado para sistemas de generación eólicos de pequeña potencia.

A modo de resumen, la siguiente tabla muestra la producción de energía final de los distintos sistemas renovables a integrar en el edificio. Como se puede

comprobar dichos sistemas aportan el 30,68% del consumo total de energía final del edificio.

	Aporte (%)	Uso	kWh/m <sup>2</sup> año*	kWh/ ocupante año	kWh/año	kWh/vida útil
Energía solar térmica de baja temperatura	10,48	Calefacción	2,11	56,95	3.702	185.100
Energía solar fotovoltaica	16,52	Electricidad	4,18	112,65	7.322,46	366.123
Energía eólica de pequeña potencia	30,37	Electricidad	7,69	207,15	13.465	673.250
TOTAL	30,68	-	13,98	376,76	24.489,46	1.224.473

Tabla 4.50. Producción de energía final procedente de sistemas renovables en el edificio CIRCE. \* Se considera la superficie útil climatizada del edificio

#### 4.4.2.3.1.3 Consumo de agua

Para calcular el consumo de agua del edificio se estima un uso diario cada cincuenta usuarios para urinarios y lavabos, un uso de cinco minutos de una ducha, un uso por cada doscientas personas por inodoro (Fundación Ecología y Desarrollo, 2003). Considerando que se trata de un edificio terciario con uso principal de oficinas y laboratorios, con 16 inodoros, 2 duchas, 4 urinarios, 16 lavabos y una ocupación de 65 personas durante 335 días/año, produciéndose el riego del jardín durante la mitad del año; se obtienen los resultados del consumo total de agua que se muestran en la siguiente tabla.

	Nº	Caudal o capacidad	Frecuencia diaria de uso	Consumo de agua diario (l/día)	Consumo de agua total anual (m <sup>3</sup> /año)
Inodoro	16	9 l	1 uso/200 personas	46,8	15,7
Duchas:	2	10 l/min	1 uso/día, 5 min/uso	50	16,8
Urinarios	4	9 l/min	1 uso/50 personas, 5 s/uso	3,9	1,3
Lavabos	16	9 l/min	1 uso/50 personas, 16 s/uso	49,92	16,7
Jardín (m <sup>2</sup> )	500	5 l/m <sup>2</sup> día	1 uso/2 días	1.250	456,3
			TOTAL	1.400,62	506,8

Tabla 4.51. Consumos de totales de agua, y de ACS para el edificio CIRCE

Excluyendo el agua de riego, el consumo diario de agua en el edificio es de aproximadamente 150 l/día, lo que supone un consumo de 2,3 l/ocupante y día, que es 50 veces menor que el correspondiente a los edificios residenciales anteriores. Incluso incluyendo el agua de riego el consumo por ocupante es 5 veces menor.

#### 4.4.2.3.1.4 Tratamiento de aguas residuales

Cabe considerar que el agua consumida por el edificio termina en desagüe, excepto la dedicada al riego, que es la mayor parte (90%). Por tanto el agua tratada como agua residual se limita a 50,5 m<sup>3</sup>/año.



#### 4.4.2.3.2. Mantenimiento

##### 4.4.2.3.2.1 Reemplazo de materiales de construcción

Para calcular las necesidades de transporte de puertas y ventanas hasta el edificio se estima un peso total de 19,266 t (calculado a partir de la Tabla 4.38).

#### 4.4.2.3.3. Reemplazo de sistemas energéticos

El nº de lámparas a reponer se muestra en la siguiente tabla.

		Potencia (W)	Nº de lámparas a reponer
PLANTA BAJA	Columna de tubos fluorescentes 12x 58W	5.563,2	96
	Aplique pared lámpara compacta 26 W	2.886,4	111
	Lámpara compacta techo 2x26 W	3.925,5	151
	Lámpara incandescente techo 60 W	3.463,68	58
	Pantalla fluorescente 2x36 W	23.020,14	640
	Pantalla fluorescente estancia 2x36 W	2.589,77	71
	Pantalla fluorescente estancia 2x58 W	23.180	400
	Emergencias planta baja	333,05	7
	TOTAL PLANTA BAJA	64.961,74	1.534
PLANTA PRIMERA	Lámpara compacta techo 2x26 W	1.154,56	44
	Lámpara incandescente techo 60 W	1.598,62	27
	Pantalla fluorescente 2x36 W	18.991,61	528
	Pantalla fluorescente estancia 2x58 W	2.781,6	49
	Pantalla fluorescente estancia 2x36 W	863,26	24
	Lámparas colgantes techo 100W (20)	4.440,61	44
	Emergencias planta primera	666,09	13
	TOTAL PLANTA PRIMERA	30.496,35	729
	POTENCIA TOTAL	95.458,09	2.263

Tabla 4.52. Potencia, número y tipología de lámparas a reponer a lo largo de la vida útil del edificio CIRCE

Para estimar el impacto asociado al transporte de los nuevos equipos generadores, equipos de aprovechamiento renovables y lámparas de iluminación hasta el edificio se consideran unos pesos similares a los indicados en el apartado 4.4.2.2.1.

## 4.5. Análisis de resultados

A continuación se discuten los principales resultados obtenidos en la evaluación del impacto del ciclo de vida de los edificios analizados, destacando los aspectos que más contribuyen al impacto y proponiendo algunas simplificaciones posibles en el análisis.

### 4.5.1. Energía incorporada total

Las siguientes gráficas muestran el impacto en energía primaria de cada una de las etapas del ciclo de vida de los edificios analizados.

Las 2 etapas de mayor impacto en los edificios residenciales son la de uso (52-60%), seguida de la producción (37-43%). Por el contrario, las etapas de construcción (1,6%-2,6%) y fin de vida (1,4-2,3%) tienen poca relevancia. El tipo de energía incorporada es principalmente de origen fósil (78%) y en menor medida, nuclear (13,8%), siendo la contribución de las energías renovables del 8,5%.

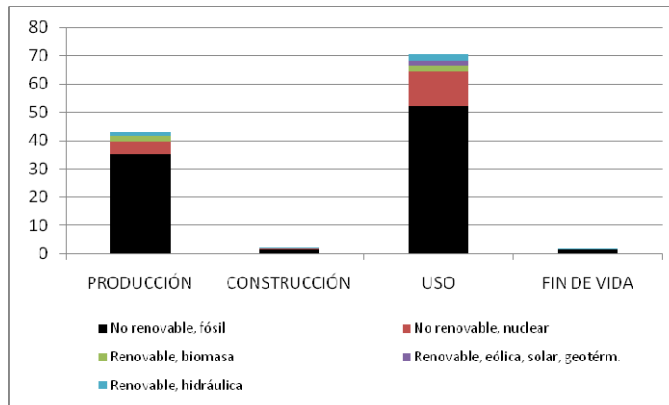


Figura 4.21. Energía incorporada (en TJ-Eq) desagregada por categorías de impacto en las distintas etapas de la vida útil del edificio residencial n° 1

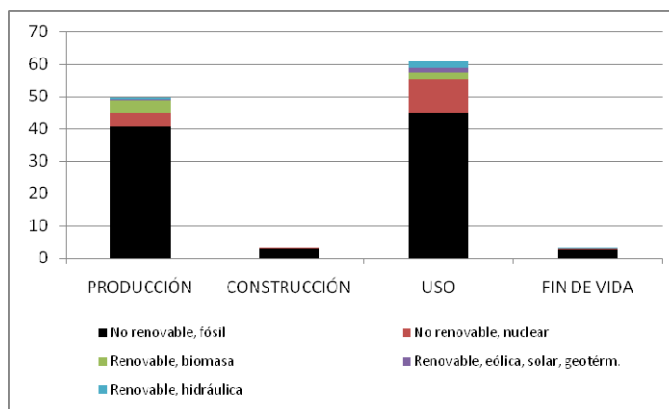


Figura 4.22. Energía incorporada (en TJ-Eq) desagregada por categorías de impacto en las distintas etapas de la vida útil del edificio residencial n° 2

Dentro de la energía fósil, el consumo de gas para cubrir tanto los consumos de calefacción y ACS como los consumos asociados a la producción de los materiales de construcción es mayoritario, seguido a distancia del consumo de petróleo y derivados, cuyo peso relativo es mayor durante la construcción y el fin de vida del edificio.

En el edificio de oficinas/I+D, se obtiene una distribución de impactos algo más repartida entre la etapa de uso y la de etapa producción que tienen en este caso un impacto similar (46%), siendo el impacto en la construcción (5%) y en el fin de vida (3%) algo superiores a los obtenidos en los otros edificios. A pesar de que la mayor parte de la energía incorporada sigue siendo de origen fósil, la fracción renovable total llega en este caso al 15%, si bien se alcanzan fracciones más elevadas en la etapa de producción, tal como se describirá posteriormente.

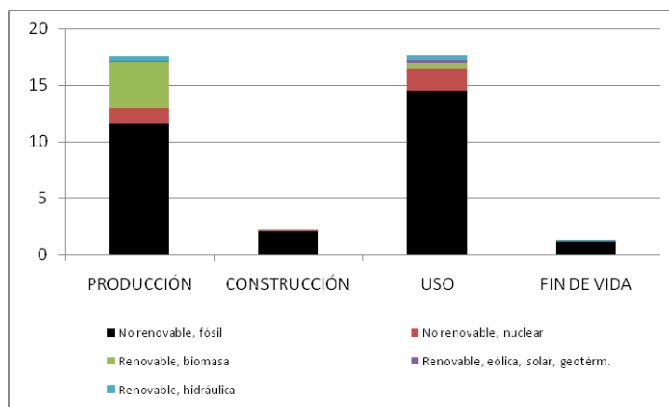


Figura 4.23. Energía incorporada (en TJ-Eq) desagregada por categorías de impacto en las distintas etapas de la vida útil del edificio de oficinas/I+D

(Dixit M.K., et al., 2010) pone de manifiesto la gran variabilidad en los ratios de energía incorporada en los materiales de los edificios. Así, dependiendo de las fuentes de datos utilizadas, los límites establecidos y las soluciones y materiales constructivos empleados, la energía incorporada en los materiales de edificios residenciales se sitúa en un rango de 3,6 a 8,76 GJ/m<sup>2</sup> construido, mientras que en edificios comerciales, el rango es aún más amplio, desde 3,4 hasta 19 GJ/m<sup>2</sup> construido. Puesto que la energía incorporada en la etapa de producción de los edificios residenciales es de 5,63-5,78 GJ/m<sup>2</sup> construido, alcanzando los 8,8 GJ/m<sup>2</sup> construido para el edificio de oficinas/I+D (nótese que los ratios de la Tabla 4.53 y posteriores son por m<sup>2</sup> útil climatizado), se puede concluir que los tres edificios analizados se situarían aproximadamente en la mitad de los rangos anteriores.

	Edificio residencial nº 1			Edificio residencial nº 2			Edificio de oficinas/I+D		
	GJ-Eq	MJ-Eq/ocupante año	MJ-Eq/m <sup>2</sup> año	GJ-Eq	MJ-Eq/ocupante año	MJ-Eq/m <sup>2</sup> año	GJ-Eq	MJ-Eq/ocupante año	MJ-Eq/m <sup>2</sup> año
Producción del edificio	42.997,75	3.659,38	177,57	49.730,96	4.324,43	223,08	17.588,40	5.411,81	200,87
Construcción del edificio	1.879,48	159,96	7,76	3.075,93	267,47	13,80	2.182,41	671,51	24,92
Uso del edificio	70.568,99	6.005,87	291,43	60.758,69	5.283,36	272,55	17.605,14	5.416,97	201,06
Fin de vida del edificio	1.643,66	139,89	6,79	2.726,20	237,06	12,23	1.259,30	387,48	14,38
<b>TOTAL EDIFICIO</b>	<b>117.089,87</b>	<b>9.965,10</b>	<b>483,55</b>	<b>116.291,78</b>	<b>10.112,33</b>	<b>521,65</b>	<b>38.635,25</b>	<b>11.887,77</b>	<b>441,24</b>

Tabla 4.53. Ratios de energía incorporada en las distintas etapas de la vida de los edificios analizados

Las malas propiedades del terreno en el que se ubica el edificio de oficinas/I+D incrementa notablemente su impacto al compararlo con los edificios residenciales. De hecho al eliminar la losa de hormigón armado (de más de 1.000 m<sup>3</sup>) y la capa de zahorras compactadas (de más de 10.000 t) el impacto energético del ciclo de vida en la etapa de producción pasa de 200,87 MJ-Eq/m<sup>2</sup> año a 155,96 MJ-Eq/m<sup>2</sup> año, reduciéndose también el impacto en la etapa de construcción (por el menor peso del material transportado) de 24,92 MJ-Eq/m<sup>2</sup> año a 12,98 MJ-Eq/m<sup>2</sup> año, y el impacto del fin de vida de 14,38 MJ-Eq/m<sup>2</sup> año a 7,76 MJ-Eq/m<sup>2</sup> año. En definitiva, el impacto energético del ciclo de vida completo pasaría de 441,24 MJ-Eq/m<sup>2</sup> año a 377,38 MJ-Eq/m<sup>2</sup> año (lo que supone una reducción de casi el 15%), disminuyendo aún más el impacto en comparación con los edificios residenciales.

En la Figura 4.24 se muestra de forma detallada la contribución de los aspectos más relevantes analizados en las distintas etapas de vida del edificio a la energía primaria incorporada.

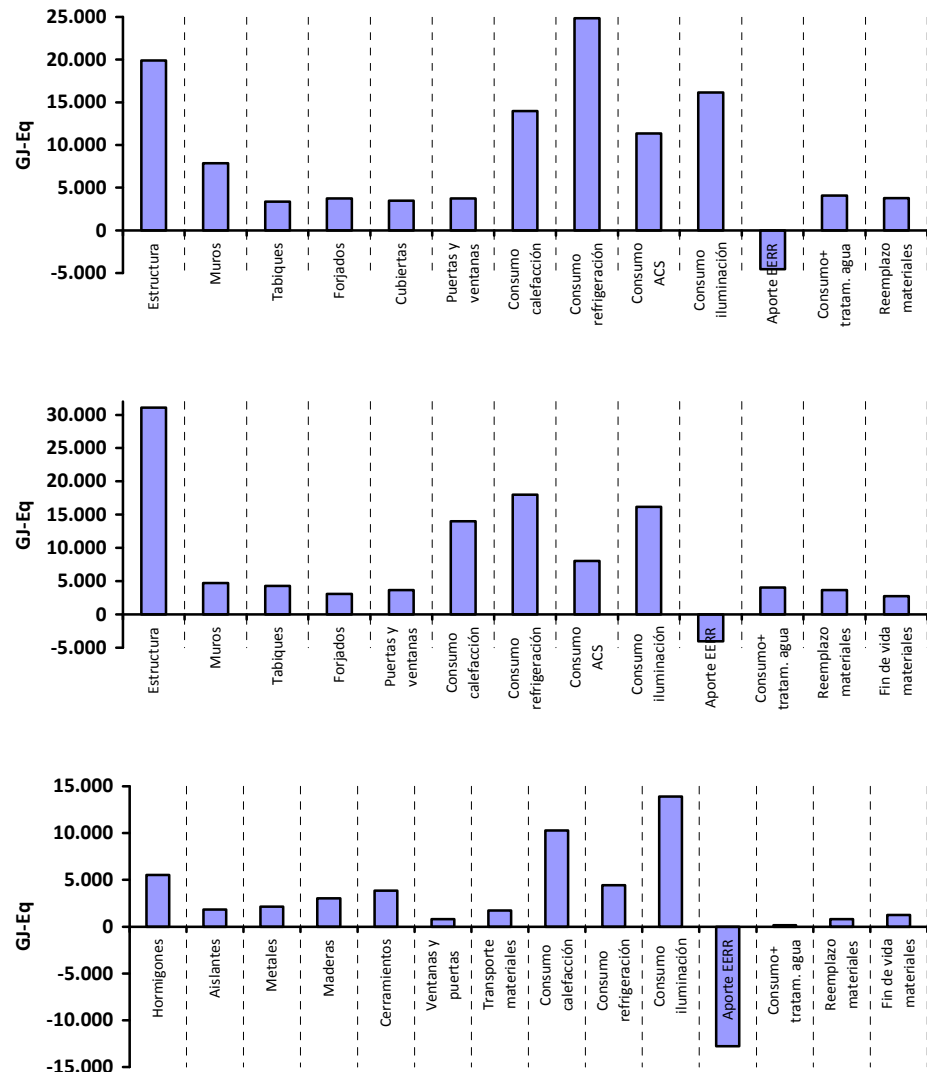


Figura 4.24. Energía incorporada desagregada en los distintos aspectos del ciclo de vida de los edificios analizados: residencial nº 1 (arriba), residencial nº 2 (centro), oficinas/I+D (abajo)

Como se puede comprobar, la distribución del impacto energético en el ciclo de vida de los edificios residenciales es similar. Así, en el edificio residencial nº 1, dentro de la etapa de uso destaca el impacto del consumo de energía para refrigeración (21%), iluminación (14%) y calefacción (12%), mientras que en la etapa de producción hay que remarcar el impacto de la fabricación de la estructura de hormigón armado (17%) y, en menor medida, de los muros del edificio (7%). Por otra parte, en la etapa de construcción tan solo destaca el transporte de los materiales de planta a obra (1,4%), mientras que en la etapa fin de vida, solo hay que reseñar el fin de vida de los cerramientos (1,2%).

El alto impacto de la refrigeración y de la iluminación, que analizados como energía final tenían un menor peso que la calefacción, se debe a los factores de conversión de energía final a energía primaria utilizados en la metodología CED. Tal como se expuso en el capítulo 2, para la conversión de electricidad a energía primaria se utiliza un factor de 3,2, mientras que para el gas natural, el factor utilizado es de 1,23.

La principal diferencia entre los 2 edificios residenciales es el impacto de la estructura, que en el edificio nº 2 representa el mayor impacto energético (35%), debido al mayor espesor de las losas de hormigón y de la segunda planta subterránea de aparcamiento existente. Esto hace que la energía incorporada en la estructura del edificio nº 2 aumente en 11.205 GJ con respecto al edificio nº 1.

En contraste con los edificios residenciales, en el edificio de oficinas/I+D, debido a su diseño, la energía incorporada en la fabricación del hormigón armado estructural se reduce en un factor de 1,8-3; lo que supone un ahorro de 1,8-4,7 GJ-Eq/m<sup>2</sup>. Asimismo el impacto asociado al consumo de climatización (en este caso principalmente para calefacción), iluminación y ACS (éste último prácticamente despreciable) con el aporte renovable descontado, se reduce en un factor de 1,3-1,4, con un ahorro de 2,6-3,7 GJ-Eq/m<sup>2</sup>. Del mismo modo, el impacto energético asociado al consumo y tratamiento de agua es evidentemente menor que en los edificios residenciales. En contraposición, y debido al mayor peso del edificio, aumenta ligeramente el impacto energético asociado al transporte planta-obra y al fin de vida de los materiales. Hay que recordar que el mayor peso se deriva de la mayor cantidad de material utilizado en el edificio a fin de conseguir una inercia térmica elevada, que junto con la adecuada orientación y la optimización del aislamiento permite obtener unos consumos energéticos directos más reducidos en la etapa de uso, así como unos menores impactos en términos globales.

A continuación se observa la reducida fracción renovable en la energía incorporada (entre el 5 y el 10%) para la fabricación de los materiales de construcción en los edificios residenciales. La excepción son las puertas de madera de ambos edificios y los muros exteriores del edificio nº 2, constituidos por materiales como el corcho o ladrillos de arcilla aligerada.

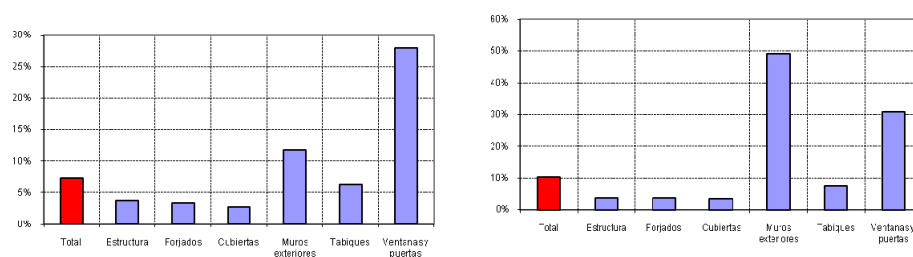


Tabla 4.54. Fracción renovable (en %) de la energía incorporada en la fabricación de los distintos materiales de construcción en los edificios residenciales nº 1 (izqda.) y nº 2 (dcha.)

Por el contrario, en el edificio de oficinas/I+D, debido al origen biomásico de sus materiales, se observa una mayor fracción renovable en su energía incorporada (27%), con la única excepción de los hormigones y los metales utilizados.

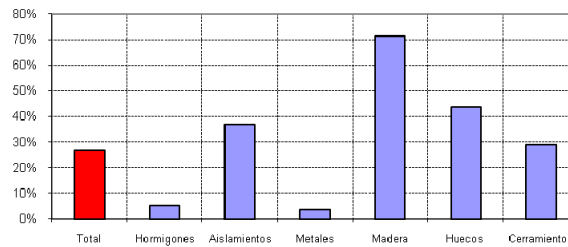


Tabla 4.55. Fracción renovable (en %) de la energía incorporada en la fabricación de los distintos materiales de construcción del edificio de oficinas/I+D

La siguiente figura desagrega el impacto en energía primaria asociado a la fabricación de los distintos materiales de construcción de los edificios analizados.

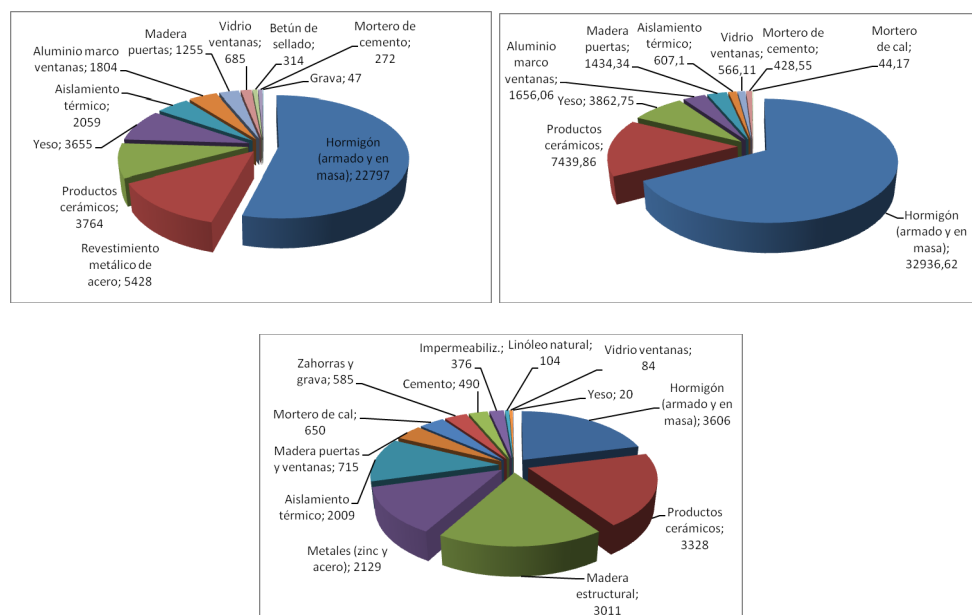


Figura 4.25. Energía incorporada (en GJ-Eq) en la fabricación de los distintos materiales de construcción del edificio residencial nº 1 (arriba izqda.), nº 2 (arriba dcha.), y oficinas/I+D /abajo)

En los tres edificios, el hormigón armado utilizado en mayor o menor medida como elemento estructural conlleva el mayor impacto energético en la etapa de fabricación de los materiales. Además en el edificio nº 1 hay que destacar el impacto de la placa galvanizada que recubre los muros del edificio, mientras que en el edificio de oficinas/I+D conviene recordar que la energía incorporada en la madera estructural y de carpintería, así como la correspondiente a la mayoría de los aislamientos térmicos, los bloques de arcilla aligerada y el mortero de cal tienen una elevada fracción renovable.

#### 4.5.2. Potencial de calentamiento global

En todos los edificios analizados la principal sustancia que contribuye al potencial de calentamiento global es el dióxido de carbono de origen fósil, responsable de más del 90% del impacto. A continuación estaría el metano con un peso del 4-6% y otros GEI.

Nuevamente en los edificios residenciales, las etapas de fin de vida (3,3-4%) y sobre todo la de construcción (1,6-2,6%) son poco relevantes. La principal diferencia entre estos dos edificios es que en el edificio residencial nº 1, la etapa de uso (51,4%) tiene más impacto que la de producción (43,7%), mientras que en el edificio nº 2, sucede lo contrario, ya que la producción representa casi el 50% del impacto, y el uso se queda en el 44%. En el edificio de oficinas/I+D, la etapa de producción y la de uso suponen el mismo impacto (40%), la construcción representa un 6%, y el fin de vida un 14%, debido a que el escenario considerado para la disposición final de los materiales biomásicos de dicho edificio ha sido su valorización energética mediante incineración.

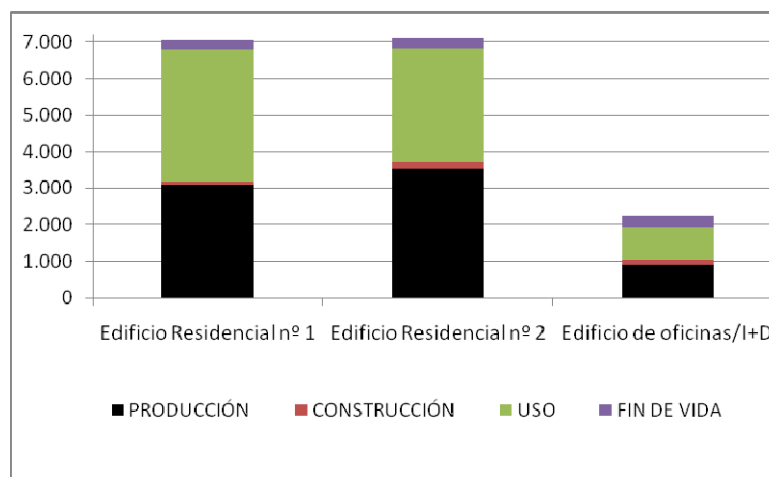


Figura 4.26. Potencial de calentamiento global (en t CO<sub>2</sub>-Eq) desglosado en las distintas etapas de la vida útil de los edificios analizados

A pesar de que los consumos durante el uso del edificio nº 2 son algo menores, la mayor cantidad de materiales de este edificio hace que su impacto global sea mayor que el del edificio nº 1, tal como se puede observar en la Tabla 4.56, que presenta las principales ratios relacionadas con el potencial de calentamiento global en los edificios analizados.

	Edificio residencial nº 1			Edificio residencial nº 2			Edificio de oficinas/I+D		
	t CO <sub>2</sub> -Eq	kg CO <sub>2</sub> -Eq/ocupante año	kg CO <sub>2</sub> -Eq/m <sup>2</sup> año	t CO <sub>2</sub> -Eq	kg CO <sub>2</sub> -Eq/ocupante año	kg CO <sub>2</sub> -Eq/m <sup>2</sup> año	t CO <sub>2</sub> -Eq	kg CO <sub>2</sub> -Eq/ocupante año	kg CO <sub>2</sub> -Eq/m <sup>2</sup> año
Producción del edificio	3.080,41	262,16	12,72	3.534,24	307,33	15,85	911,75	280,54	10,41
Construcción del edificio	111,82	9,52	0,46	182,79	15,89	0,82	129,71	39,91	1,48
Uso del edificio	3.619,81	308,07	14,95	3.106,35	270,12	13,93	909,07	279,71	10,38
Fin de vida del edificio	232,24	19,77	0,96	287,40	24,99	1,29	309,64	95,27	3,54
<b>TOTAL EDIFICIO</b>	<b>7.044,28</b>	<b>599,51</b>	<b>29,09</b>	<b>7.110,78</b>	<b>618,33</b>	<b>31,90</b>	<b>2.260,17</b>	<b>695,44</b>	<b>25,81</b>

Tabla 4.56. Ratios de potencial de calentamiento global en las distintas etapas de la vida de los edificios analizados

Al igual que se comentó en el apartado anterior, las malas propiedades del terreno donde se ubica el edificio de oficinas/I+D, aumentan sus necesidades estructurales y conllevan un aumento en sus emisiones en las etapas de producción, construcción y fin de vida, que de otra forma serían aún menores. De hecho al eliminar la losa de hormigón armado y la capa de zahorras compactadas, el potencial de calentamiento

total del ciclo de vida completo pasaría de 25,81 kg CO<sub>2</sub>-Eq/m<sup>2</sup> año a 19,94 kg CO<sub>2</sub>-Eq/m<sup>2</sup> año (lo que supone una reducción de casi el 23%).

Como se puede comprobar en la Figura 4.27, los aspectos que producen un mayor potencial de calentamiento global son bastante similares a los que aumentaban la energía incorporada, lo que demuestra la fuerte relación existente entre estos dos indicadores de impacto.

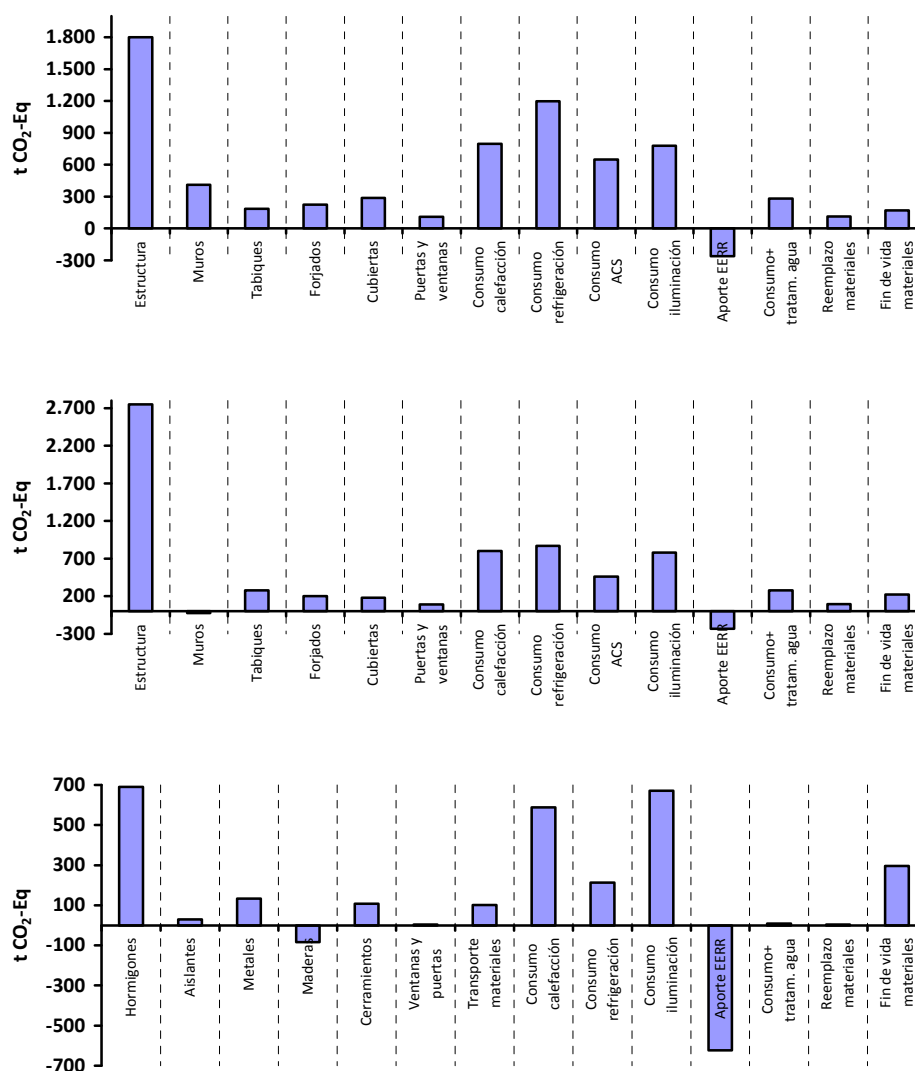


Figura 4.27. Potencial de calentamiento global en los distintos aspectos del ciclo de vida de los edificios analizados: residencial n° 1 (arriba), residencial n° 2 (centro), oficinas/I+D (abajo)

Una vez más, la diferencia más significativa entre los 2 edificios residenciales es el impacto de la estructura. En el edificio n° 2 representa el 39% del impacto, mientras que en el edificio n° 1 supone el 25% del impacto, estimándose la diferencia entre dichas estructuras en casi 950 t CO<sub>2</sub>-Eq. Otra diferencia a señalar es el impacto de los muros. Así, mientras en el edificio n° 1, la fabricación de los materiales de los muros conlleva una emisión de 410 t CO<sub>2</sub>-Eq, en el edificio n° 2,



debido al uso de corcho y bloques de arcilla aligerada durante la fabricación se produce una absorción neta de 24 t CO<sub>2</sub>-Eq.

Nuevamente hay que destacar la reducción del impacto en un factor de 1,2-2, debido a la menor cantidad de hormigón armado estructural en el edificio de oficinas/I+D; pudiendo llegar a evitar la emisión de hasta 310 kg CO<sub>2</sub>-Eq/m<sup>2</sup> con respecto a los edificios residenciales. Asimismo, el aporte renovable compensa el 42% del impacto asociado a los consumos directos de la etapa de uso, evitando la emisión de 624 t CO<sub>2</sub>-Eq. En contraposición, la repercusión del transporte planta-obra y el fin de vida de los materiales es algo mayor que en los edificios residenciales.

En la Figura 4.28 se presenta el potencial de calentamiento global derivado de la fabricación de los materiales de construcción para los edificios analizados.

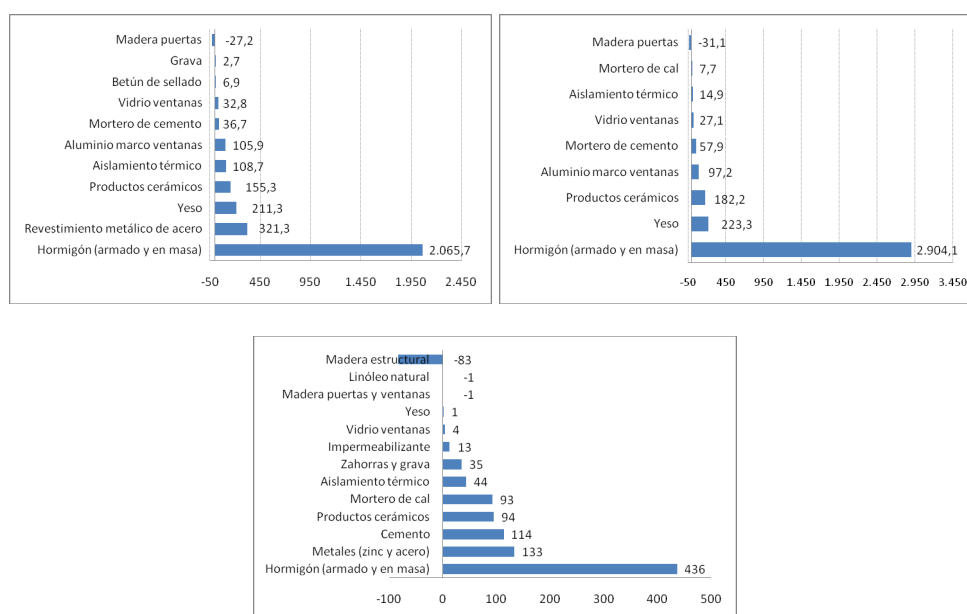


Figura 4.28. Potencial de calentamiento global (en t CO<sub>2</sub>-Eq) en la fabricación de los distintos materiales de construcción del edificio residencial n°1 (arriba izqda.), n°2 (arriba dcha.), y oficinas/I+D (abajo)

Al igual que sucedía al analizar la energía incorporada, el impacto del hormigón armado estructural es predominante en el edificio residencial n° 1 (68%), y más aún en el edificio n° 2 (83%). En este edificio cabe destacar la absorción de CO<sub>2</sub> asociada al corcho y los bloques de arcilla aligerada, que contribuyen a disminuir las emisiones correspondientes a los aislamientos térmicos y los productos cerámicos en 5,6 t CO<sub>2</sub>-Eq y 41,8 t CO<sub>2</sub>-Eq respectivamente. Además en ambos edificios, la madera utilizada en la carpintería contribuye a reducir las emisiones en un rango de 27-31 t CO<sub>2</sub>-Eq.

Respecto al edificio de oficinas/I+D, a pesar de que el hormigón sólo se utiliza como losa de cimentación, supone casi el 50% del impacto en huella de carbono de los materiales. Destaca la absorción de CO<sub>2</sub> asociada a la madera utilizada en la estructura y carpintería, al corcho y a los bloques de arcilla aligerada, disminuyendo nuevamente las emisiones correspondientes a los aislamientos térmicos y los productos cerámicos.

### 4.5.3. Huella hídrica

En los edificios residenciales, la huella hídrica se concentra mayoritariamente en la etapa de uso de los edificios (90,1-91,3%) concentrándose en el consumo de agua potable fría y caliente (79-81%). El resto del impacto se debe a la etapa de fabricación de los materiales (8,1-9,6%), siendo la huella hídrica en las etapas de construcción y fin de vida lógicamente despreciable (<0,4%).

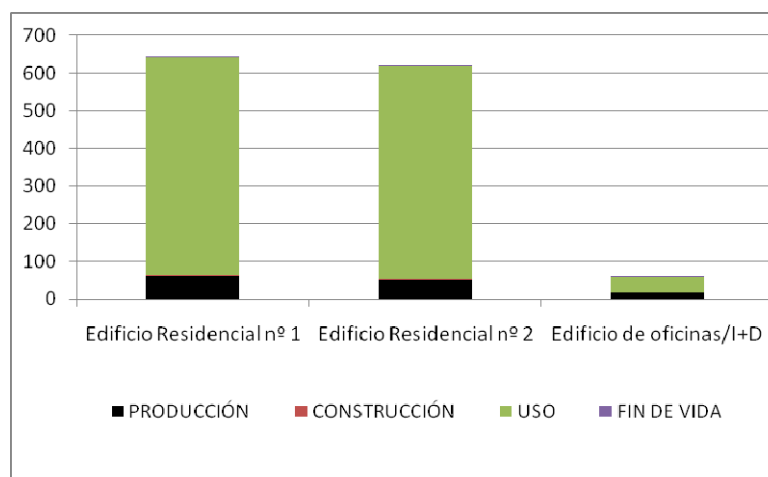


Figura 4.29. Huella hídrica (en Dm<sup>3</sup>) desagregada en las distintas etapas de la vida útil de los edificios analizados

Debido al bajo consumo de agua potable del edificio de oficinas/I+D, la huella hídrica correspondiente a la etapa de fabricación de sus materiales sube hasta el 28%, reduciéndose la huella hídrica en su etapa de uso al 69%, obteniendo unos impactos residuales (<2%) en el resto de etapas.

	Edificio residencial nº 1			Edificio residencial nº 2			Edificio de oficinas/I+D		
	Dm <sup>3</sup>	l/ocupante año	l/m <sup>2</sup> año	Dm <sup>3</sup>	l/ocupante año	l/m <sup>2</sup> año	Dm <sup>3</sup>	l/ocupante año	l/m <sup>2</sup> año
Producción del edificio	61,56	5.239,24	254,23	50,49	4.390,55	226,49	16,63	5.115,70	189,88
Construcción del edificio	0,89	75,91	3,68	1,44	125,42	6,47	0,99	305,19	11,33
Uso del edificio	579,83	49.347,25	2.394,54	565,82	49.201,77	2.538,11	40,91	12.587,78	467,23
Fin de vida del edificio	1,37	116,90	5,67	2,22	193,30	9,97	1,16	358,45	13,30
<b>TOTAL EDIFICIO</b>	<b>643,66</b>	<b>54.779,30</b>	<b>2.658,12</b>	<b>619,98</b>	<b>53.911,04</b>	<b>2.781,04</b>	<b>59,69</b>	<b>18.367,11</b>	<b>681,74</b>

Tabla 4.57. Ratios de huella hídrica en las distintas etapas de la vida de los edificios analizados

La Figura 4.30 muestra la huella hídrica de la fabricación de los materiales de construcción en los edificios analizados. En todos los casos, la mayor huella hídrica corresponde al hormigón, siendo su repercusión más alta conforme más cantidad de este material contenga el edificio.

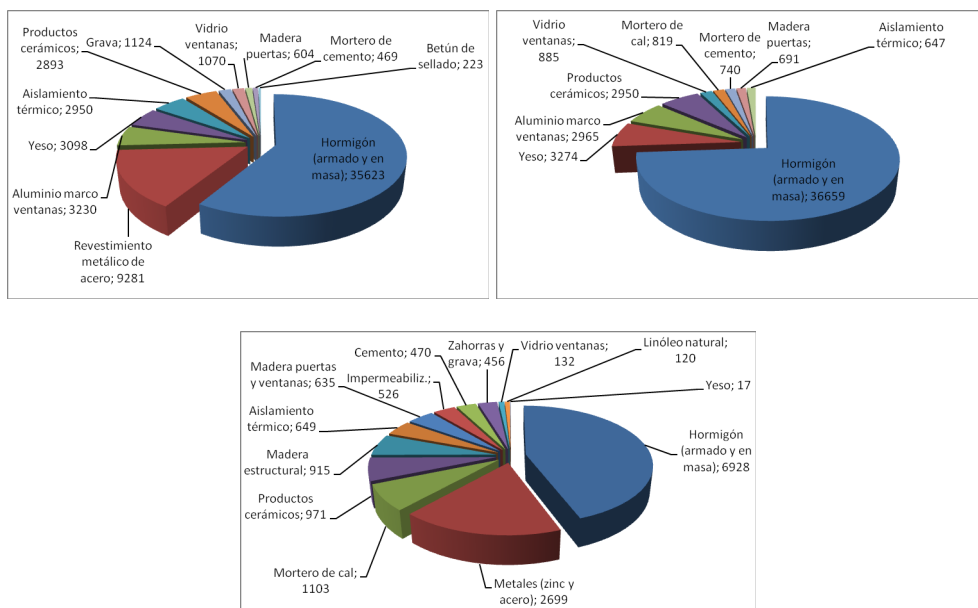


Figura 4.30. Huella hídrica (en m<sup>3</sup>) en la fabricación de los distintos materiales de construcción del edificio residencial n° 1 (arriba izqda.), n° 2 (arriba dcha.), y oficinas/I+D (abajo)

Destaca asimismo la huella hídrica del revestimiento metálico del edificio residencial n° 1, que representa el 15% del impacto asociado a los materiales.

#### 4.5.4. Puntuación única

La Figura 4.31 y la Figura 4.32 muestran la puntuación única -según el Ecoindicador 99- de cada una de las etapas del ciclo de vida de los edificios residenciales desagregada por categorías de impacto. La etapa de mayor impacto es la de producción (50%), seguida de la de uso (42-45%), mientras que las etapas de fin de vida (3-5%) y construcción (2-3%) tienen poca relevancia. Las categorías de impacto que más contribuyen a la puntuación única son los combustibles fósiles (44-50%) y los inorgánicos respirados (30-31%). En menor medida habría que destacar también el cambio climático (8%), la ecotoxicidad (6%), y los minerales (6%).

En cuanto a las categorías de daño, en los edificios residenciales, destacan los daños a los recursos (45-52%) y a la salud humana (42-43%), siendo menos relevantes los daños a la calidad del ecosistema (6-12%).

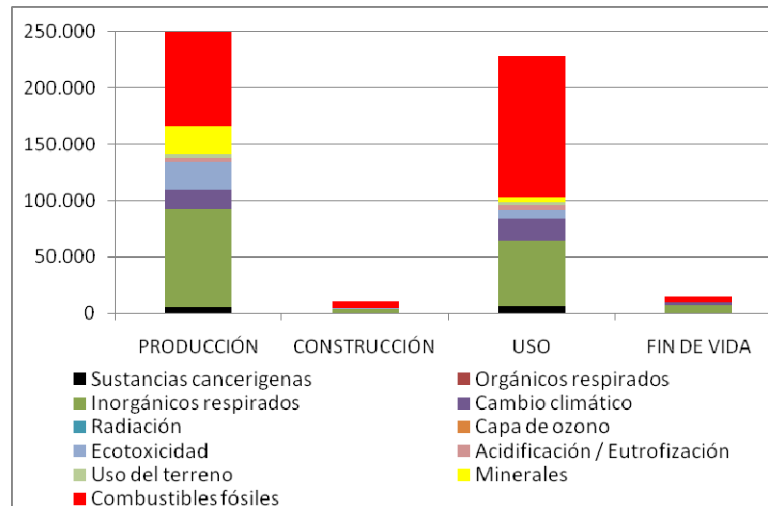


Figura 4.31. Puntuación única (en Pt) desagregada por categorías de impacto en las distintas etapas de la vida útil del edificio residencial n° 1

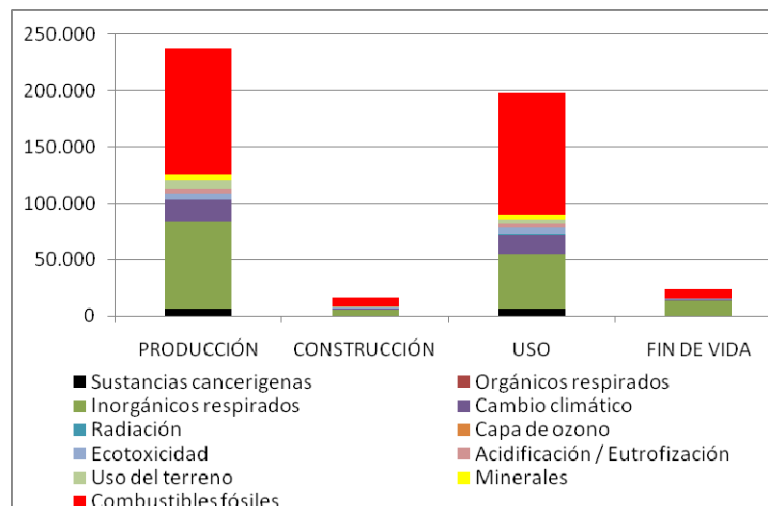


Figura 4.32. Puntuación única (en Pt) desagregada por categorías de impacto en las distintas etapas de la vida útil del edificio residencial n° 2

Tal como muestra la Figura 4.33, en el edificio de oficinas/I+D, la etapa de mayor impacto sigue siendo la de producción (53%), seguida de la de uso (32%), pero a diferencia de los edificios anteriores, las etapas de fin de vida (8%) y construcción (7%) adquieren cierta relevancia. Como ya se explicó, esto se debe al mayor peso del edificio, que aumenta los impactos asociados al transporte planta-obra y al fin de vida de los materiales.

En cuanto a la repercusión de las categorías de impacto en la puntuación única total, las que más contribuyen vuelven a ser los combustibles fósiles (41%) y los inorgánicos respirados (26%).

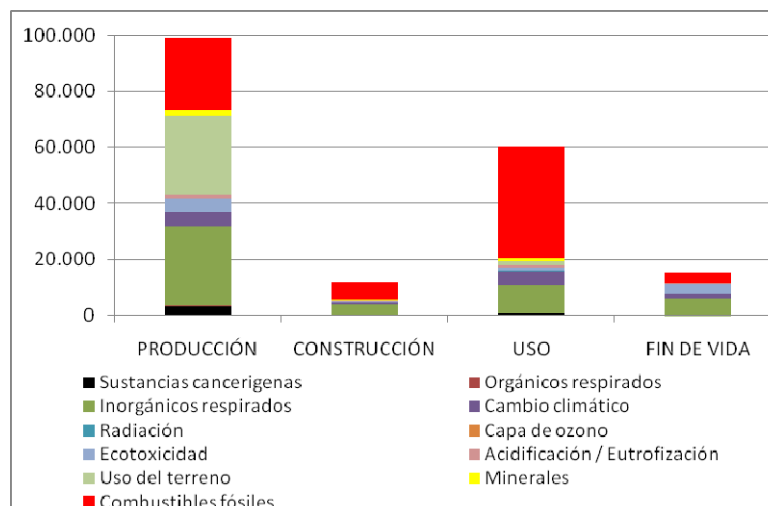


Figura 4.33. Puntuación única (en Pt) desagregada por categorías de impacto en las distintas etapas de la vida útil del edificio de oficinas/I+D

Los impactos en las etapas de construcción y fin de vida del edificio de oficinas/I+D contribuyen a elevar la puntuación única por m<sup>2</sup> y año de este edificio. Si dichos impactos fuesen del mismo orden que los de los edificios residenciales, el edificio de oficinas/I+D obtendría el menor valor de puntuación única por m<sup>2</sup> y año.

	Edificio residencial n° 1			Edificio residencial n° 2			Edificio de oficinas/I+D		
	Pt	Pt/ocupante año	Pt/m <sup>2</sup> año	Pt	Pt/ocupante año	Pt/m <sup>2</sup> año	Pt	Pt/ocupante año	Pt/m <sup>2</sup> año
Producción del edificio	255.382,36	21,73	1,05	236.828,03	20,59	1,06	99.031,43	30,47	1,13
Construcción del edificio	10.339,36	0,88	0,04	16.853,18	1,47	0,08	11.888,45	3,66	0,14
Uso del edificio	228.181,38	19,42	0,94	197.544,49	17,18	0,89	60.186,37	18,52	0,69
Fin de vida del edificio	14.347,85	1,22	0,06	23.919,28	2,08	0,11	15.203,51	4,68	0,17
<b>TOTAL EDIFICIO</b>	<b>508.250,95</b>	<b>43,26</b>	<b>2,10</b>	<b>475.144,99</b>	<b>41,32</b>	<b>2,13</b>	<b>186.309,77</b>	<b>57,33</b>	<b>2,13</b>

Tabla 4.58. Ratios de puntuación única en las distintas etapas de la vida de los edificios analizados

La Figura 4.34 muestra los aspectos del ciclo de vida que más contribuyen a la puntuación única en los edificios analizados.

En los dos edificios residenciales, la mayor puntuación única se debe a la estructura que representa el 22,6% de la puntuación en el edificio n° 1, ascendiendo al 32,6% en el edificio n° 2 debido a la segunda planta subterránea y los mayores espesores utilizados. Otra diferencia a señalar es el mayor impacto de los muros del edificio n° 1, 5 veces mayor que el del edificio n° 2. Esto es debido al uso de fibra de vidrio y sobretodo de placas de acero como revestimiento del muro del edificio n° 1, en contraposición del muro del edificio n° 2, donde además de no utilizar dicho revestimiento se utilizan corcho y bloques de arcilla aligerada. En la etapa de uso hay que subrayar el impacto del consumo de energía para refrigeración, calefacción, iluminación y ACS, éste último compensado parcialmente a través de los captadores solares térmicos existentes en ambos edificios. Por otra parte, en el edificio n° 2, el fin de vida de los cerramientos y el transporte de los materiales de planta a obra son aproximadamente 1,7 veces mayores que en el edificio n° 1, lo

que se explica debido a que el peso del edificio nº 2 es 1,6 veces superior al del edificio nº 1.

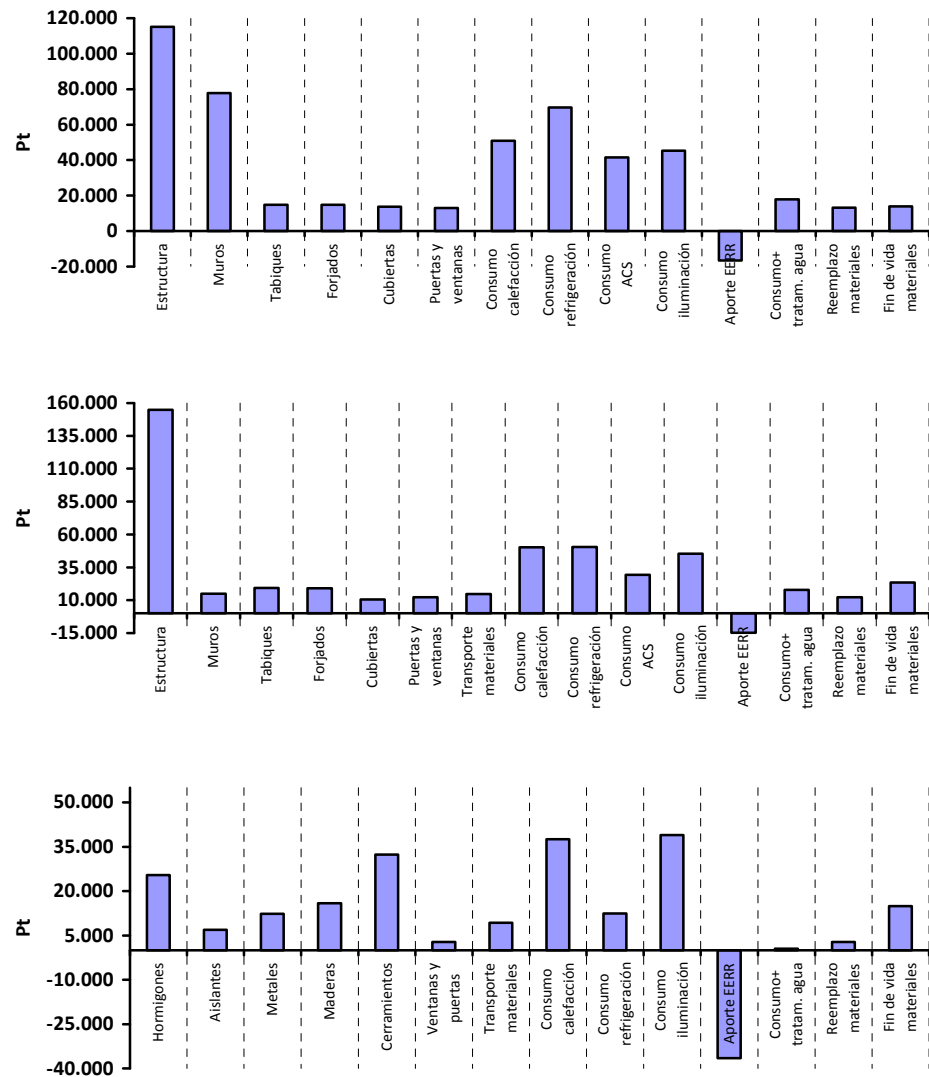


Figura 4.34. Puntuación única en los distintos aspectos del ciclo de vida de los edificios analizados: residencial nº 1 (arriba), residencial nº 2 (centro), oficinas/I+D (abajo)

Como consecuencia del mayor peso del edificio de oficinas/I+D, el impacto del transporte de los materiales de planta a obra y el fin de vida de los materiales constructivos, adquieren una mayor relevancia en la puntuación única. Asimismo hay que remarcar el impacto en la fabricación de materiales para los cerramientos, como el ladrillo, y los materiales basados en cemento y hormigón, aún cuando en este último caso los valores que presentan son inferiores a los de los edificios residenciales.

#### 4.5.5. Análisis de ciclo de vida simplificado

En esta sección se realiza una simplificación del análisis de ciclo de vida completo realizado en el apartado anterior. Dicha simplificación consiste en:

- Seleccionar como categorías de impacto únicamente la energía incorporada y el potencial de calentamiento global.
- Dejar fuera de los límites del sistema las etapas de construcción y fin de vida.
- Limitar los aspectos incluidos en la etapa de producción del edificio a la fabricación de la estructura y cerramientos del edificio.
- Limitar los aspectos incluidos en la etapa de uso del edificio al consumo de energía final necesario para la operación del edificio.

Las siguientes figuras comparan los impactos del ciclo de vida obtenidos a partir de las anteriores consideraciones frente a los resultados del ACV completo.

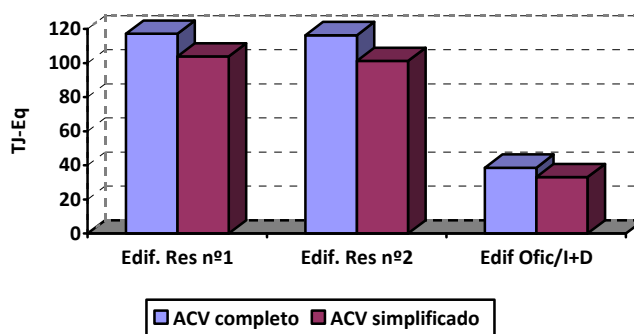


Figura 4.35. Comparación del impacto en energía incorporada en los edificios analizados mediante el ACV completo y el ACV simplificado

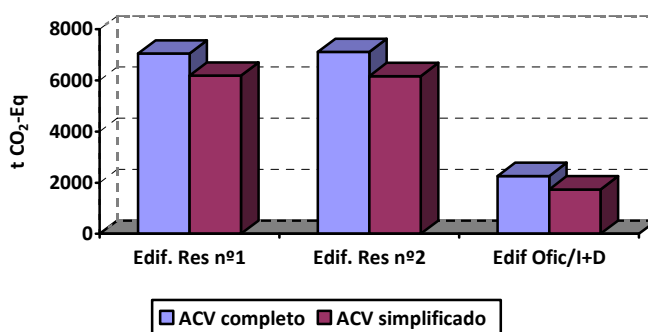


Figura 4.36. Comparación del impacto en potencial de calentamiento global en los edificios analizados mediante el ACV completo y el ACV simplificado

A partir de las figuras se puede justificar que el error cometido al simplificar el análisis es asumible para los edificios residenciales, máxime teniendo en cuenta el tiempo en que se reduce el estudio, especialmente durante la fase de adquisición de datos. La simplificación propuesta resulta, por tanto, adecuada de cara a conseguir una universalización en el uso del ACV entre los agentes del sector de la construcción.

El error cometido puede ser mayor en el caso de edificios terciarios, por lo que dicha simplificación no sería totalmente aplicable en esta tipología de edificios, requiriéndose de un mayor número de estudios para sacar conclusiones relevantes, debido a la heterogeneidad de estos edificios.

#### **4.6. Ampliación del ACV a nivel de urbanización**

---

La mayor parte de modelos de ACV aplicados a la edificación establecen los límites del sistema en el propio edificio, excluyendo impactos importantes como la movilidad de los ocupantes, las infraestructuras necesarias existentes alrededor de los edificios (calles, viales, aparcamientos, suministro de agua y energía) y la disminución de la productividad primaria neta potencial, o lo que es lo mismo, de la cantidad máxima de biomasa que puede producir un ecosistema, debido a la transformación de suelos con potencial agrícola en suelos artificiales urbanizados y redes e infraestructuras de transporte, lo que repercute en una menor asimilación de CO<sub>2</sub> en la biosfera, un aumento de la escorrentía y una disminución de la capacidad de recarga de los acuíferos.

Por ello, y a pesar de que esta tesis está enfocada hacia el ACV aplicado a las edificaciones, más que a las urbanizaciones, a continuación se presentan algunos resultados obtenidos relativos al impacto de los procesos de urbanización, que resultan de gran interés. En la evaluación de los impactos de las infraestructuras de transporte, energía y agua se ha utilizado nuevamente *Ecoinvent v2.0* (2007) como fuente de datos.

##### **4.6.1. La productividad primaria neta potencial**

La pérdida de productividad primaria neta potencial asociada a la urbanización del territorio depende de las características del propio terreno. Por ejemplo, en el norte de España, dicho valor de productividad es de 0,4 kg de materia seca por m<sup>2</sup> y año, mientras que en algunas zonas del sur puede descender hasta los 0,1 kg de materia seca por m<sup>2</sup> y año (Guaita N., et al., 2009).

En términos energéticos, suponiendo un valor calorífico de 4.000 kcal/kg para la biomasa seca (Fernández J., 1982), 0,4 kg/m<sup>2</sup> año equivalen a 1,9 kWh/m<sup>2</sup> año, lo que representa el 1,3% del impacto total del ciclo de vida de los bloques de viviendas analizados anteriormente. Pero además hay que considerar que esta artificialización del terreno, especialmente si se trata de suelo fértil, aumenta las necesidades de transporte al tener que traer los alimentos que se van a dejar de producir desde distancias cada vez mayores.

A modo de ejemplo, si un terreno dedicado a la producción de tomate, con un rendimiento de 10 kg de tomate/m<sup>2</sup> año, se transforma en suelo urbano, y el tomate que deja de producir se transporta desde una huerta situada a 800 km (que es la distancia que hay entre Zaragoza y Almería), entonces ese terreno urbanizado habrá inducido un consumo adicional de 7,3 kWh/m<sup>2</sup> año.



Y finalmente conviene recordar la cantidad de energía recibida por el terreno en forma de radiación solar que en buena parte se desaprovechará en el proceso de urbanización. Por ejemplo, un suelo situado en una ciudad como Zaragoza, recibe un promedio de 1.644 kWh/m<sup>2</sup> año (Breto S., Turégano J.A., Uriel A., 2008).

#### 4.6.2. Las infraestructuras de abastecimiento de agua

El impacto del abastecimiento de agua potable desde su origen hasta llegar a los usuarios finales en los edificios se debe principalmente a los consumos de electricidad para el bombeo (que dependerán de los desniveles existentes) y en menor medida, para la potabilización. El consumo energético del ciclo del agua desde su captación hasta su vertido final se sitúa entre 1 y 2 kWh/m<sup>3</sup> (Cuchí A., 2010), que se aproxima a los resultados obtenidos en la Figura 4.37.

La optimización de la red de suministro de agua pasa por el bombeo distribuido a través de un conjunto de estaciones intermedias, ya que la existencia de una única estación de bombeo para un municipio conlleva generalmente un aumento excesivo de la presión de la red con objeto de garantizar la presión suficiente a los puntos más altos, debiendo realizar estrangulaciones por medio de válvulas reductoras de presión en otros puntos más bajos, aumentando la ineficiencia del suministro, así como el riesgo de rotura de tuberías debido a la alta presión que se les impone.

Adicionalmente el planteamiento de redes malladas en detrimento de las redes ramificadas, permitiría también una mejor repartición de la presión, además de una mayor fiabilidad de suministro.

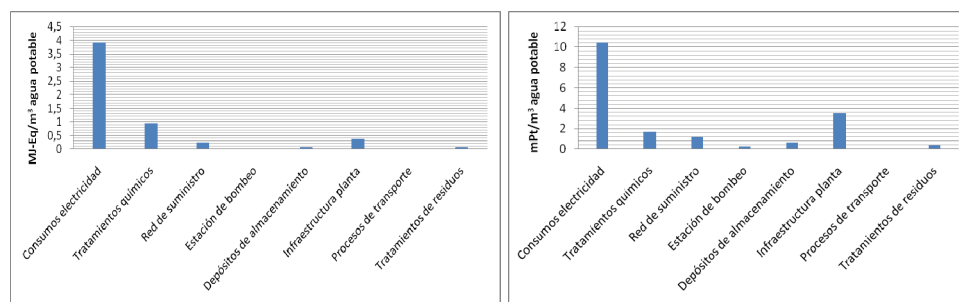


Figura 4.37. Energía primaria incorporada (en MJ-Eq) y puntuación única (en mPt) de 1 m<sup>3</sup> de agua potable desde captación hasta el usuario

A pesar de que la vida útil de las infraestructuras necesarias para llevar el agua desde los puntos de captación hasta los usuarios de los edificios suele ser larga, su impacto es elevado. Cada metro de la red de suministro de agua, formado por tuberías de hierro fundido, tiene una energía incorporada de 744,7 MJ-Eq/m y una huella de carbono de 44,9 kg CO<sub>2</sub>-Eq/m.

Además, según la Asociación Española de Abastecimiento de Aguas y Saneamientos, las pérdidas de agua potable en las redes de abastecimiento son del 25-30%, debido al irregular estado de las tuberías. En una ciudad como Zaragoza existen actualmente 366 km de tuberías de fibrocemento, que además de soportar peor la presión y ser, por tanto, más propensas a la rotura, pueden llegar a producir efectos nocivos sobre la salud de la población.

El alto impacto del resto de infraestructuras de abastecimiento se muestra en la tabla siguiente, debiéndose en su mayor parte al acero, hormigón y cemento utilizados en dichas infraestructuras.

	Energía primaria incorporada (GJ-Eq)	Potencial de calentamiento global (t CO <sub>2</sub> -Eq)
Estación de bombeo	1.560,5	161,6
Depósitos de almacenamiento	3.309,1	322,3
Infraestructura planta	31.520,2	3.869,2

Tabla 4.59. Energía primaria incorporada y potencial de calentamiento global de las infraestructuras de abastecimiento de agua potable

La suma del impacto energético de las tres infraestructuras que aparecen en la tabla puede suponer aproximadamente el 80% del impacto asociado a uno de los bloques de viviendas analizados (excluyendo su etapa de uso).

Otro de los aspectos a tener en cuenta es la falta generalizada de cubrimiento de los depósitos de almacenamiento de agua potable, lo que aumenta las pérdidas por evaporación.

#### 4.6.3. Las infraestructuras de suministro energético

En cuanto al impacto del suministro eléctrico hay que destacar que el hexafluoruro de azufre, comúnmente utilizado como gas aislante en los seccionadores de media y alta tensión por su alta rigidez dieléctrica, tiene el potencial de calentamiento global más elevado de todos los gases incluidos en el Protocolo de Kyoto, 22.800 veces superior al CO<sub>2</sub> con una vida en la atmósfera de más de 3.000 años (Forster P., et al., 2007).

Según el Ministerio de Medio Ambiente, a pesar de los esfuerzos realizados por las compañías eléctricas, las emisiones equivalentes anuales de este gas en España superaron en 2008 las 326 ktCO<sub>2</sub>-Eq, que si bien solo supone el 0,4% de todas las emisiones correspondientes al sector eléctrico, presenta un claro potencial de mejora. Para ello, se requeriría invertir en I+D, con objeto de encontrar un sustituto técnica y económicamente viable para este gas.

La larga vida útil tanto de las redes eléctricas como de los gasoductos hace que su contribución al impacto total del ciclo de vida de la electricidad o gas suministrado sea mínima. Por ejemplo, según el Ecoindicador 99, la red eléctrica en baja tensión representa algo más del 5% del impacto total del ciclo de vida de la electricidad suministrada, mientras que el impacto de los gasoductos de baja presión representa menos del 2% del impacto total del ciclo de vida del gas suministrado.

Sin embargo, esto no conlleva que su impacto sea bajo. La siguiente tabla presenta el impacto medio por cada metro de la red eléctrica y de gas para el suministro de edificios, incluyendo el impacto de las correspondientes estaciones eléctricas de conmutación media/baja tensión y otros equipamientos auxiliares necesarios. En el caso de la red eléctrica, el mayor impacto se debe al cobre, acero y PCV utilizados en las infraestructuras de suministro; mientras que en el caso de los gasoductos, el impacto se centra en el acero y el polietileno de alta densidad (HDPE) requeridos.

	Energía primaria incorporada (MJ-Eq/m)	Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq/m)
Red de suministro eléctrico	237,1	13,3
Red de suministro de gas	455,5	83,6
<b>TOTAL</b>	<b>692,6</b>	<b>96,9</b>

Tabla 4.60. Energía primaria incorporada y potencial de calentamiento global de las infraestructuras de suministro energético

A partir de los datos anteriores, se requieren 67-80 km de infraestructura energética para que su impacto energético sea similar al asociado a los bloques de viviendas analizados (sin contabilizar su etapa de uso).

#### 4.6.4. Las infraestructuras para la movilidad

Asimismo hay que destacar el altísimo impacto de las infraestructuras necesarias para el movimiento de vehículos y personas, especialmente de las calzadas. En la siguiente tabla se muestra el impacto asociado a la construcción de 1 m<sup>2</sup> de aceras y calzadas, excluyendo su mantenimiento y disposición final. En el caso de las aceras, se ha supuesto un firme tipo compuesto por una baldosa de hormigón (4 cm), mortero de cemento (5 cm), solera de hormigón (13 cm) y una subbase granular (15 cm); mientras que en el caso de las calzadas, el firme estaría formado por una mezcla bituminosa (10 cm), una base de grava-cemento (20 cm) y una subbase de zahorra artificial (20 cm).

	Energía primaria incorporada (MJ-Eq/m <sup>2</sup> )	Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq/m <sup>2</sup> )
Aceras	452,1	72,4
Calzadas	2.249	210
<b>TOTAL</b>	<b>2.701,1</b>	<b>282,4</b>

Tabla 4.61. Energía primaria incorporada y potencial de calentamiento global de las aceras y calzadas

Más de la mitad del impacto de las aceras se debe a la solera de hormigón, mientras que en las calzadas, destaca el elevado valor de energía incorporada del asfalto, cuya contribución supera el 66% del total. Dicha contribución se reduce al 35% en el caso del impacto en CO<sub>2</sub>, donde predomina el impacto de la base de grava-cemento.

Una solución para disminuir los impactos asociados al pavimento de las calzadas en las ciudades es la utilización de hormigón en vez de asfalto. Por un lado, se reduce el consumo de combustible (sobretudo gasóleo) requerido durante la construcción de las calzadas de asfalto y se obtiene una reducción total en las emisiones de 17 kg CO<sub>2</sub>-Eq/m<sup>2</sup>, eliminando las emisiones de compuestos orgánicos volátiles que se producen tanto en el proceso de asfaltado como durante la vida útil en los meses de más calor. Además el hormigón requiere un menor mantenimiento (lo que compensa su mayor coste inicial) y posee una mayor reflectancia superficial, lo que reduce ligeramente las necesidades lumínicas y disminuye el efecto de isla de calor en comparación con el asfalto. Puesto que la materia prima principal del asfalto es petróleo, el uso de hormigón contribuye a disminuir la

dependencia energética exterior. En cuanto al tradicional problema del ruido causado por los pavimentos de hormigón, las nuevas técnicas de alisado de la superficie producen un nivel de ruido similar al del asfalto.

Además hay que subrayar la posibilidad de utilizar hormigón reciclado compuesto por árido triturado para pavimentar, como se demuestra en los viales de acceso a la competición Solar Decathlon Europa (Madrid), donde al árido reciclado procedente de la demolición de una obra se le han añadido fibras de polipropileno que disminuyen la fisuración superficial del pavimento. Asimismo, cabe destacar el nuevo puente de Manises (Valencia), donde las vigas del anterior puente se han reutilizado, rompiéndolas y separando el acero del hormigón, que se ha mezclado con hormigón nuevo, disminuyendo el impacto de esta infraestructura de obra civil.

#### **4.6.5.El impacto de la movilidad urbana**

Para evaluar el impacto asociado a la movilidad en los edificios analizados y compararlo con los impactos obtenidos en el apartado 4.5, se ha realizado un estudio detallado de la movilidad urbana, por medio de una encuesta dirigida a los usuarios de dichos edificios.

##### **4.6.5.1.Metodología**

El estudio comenzó con el diseño y envío de un formulario en el que los usuarios hicieran constar un conjunto de datos relacionados con su movilidad urbana.

En el formulario enviado a los edificios residenciales a principios de 2010, con la colaboración de la Asociación “Somos Valdespartera”, se incluye la tipología de vehículos existentes en las viviendas, el medio de transporte utilizado habitualmente a lo largo del año para los desplazamientos desde sus domicilios hasta sus centros de trabajo y los centros comerciales y de ocio, mediante la indicación del nº total de trayectos diarios o semanales realizados (incluyendo ida y vuelta), el número de kilómetros de cada trayecto diario o semanal, el medio de transporte empleado (turismo, monovolumen, motocicleta, furgoneta, autobús, bicicleta, a pie), el tipo de combustible utilizado (gasolina o diesel) y el número de personas desplazadas habitualmente en el mismo vehículo. La encuesta contempla la posibilidad de distintas modalidades de desplazamiento a lo largo del año, dando la opción de ponderarlas. El número de respuestas válidas obtenidas entre los 2 edificios fue de 20, muestra que se estima suficiente para obtener unos resultados representativos, teniendo en cuenta la mínima dispersión de las respuestas obtenidas en los formularios. Por este motivo, se decidió considerar el mismo impacto en movilidad para los dos edificios residenciales.

El formulario enviado al personal del edificio CIRCE a mediados de 2009 presenta la misma estructura, si bien se centra exclusivamente en los desplazamientos desde los domicilios hasta el propio edificio. En este caso se enviaron 65 encuestas, que coincide con la ocupación estimada para el edificio CIRCE, obteniendo una respuesta del 100%, por lo que los datos obtenidos son totalmente representativos.

En el caso del edificio CIRCE, para obtener una mayor fiabilidad, las distancias del domicilio al edificio fueron recalculadas a través de las aplicaciones *Google Maps* y *Google Earth*. Para estimar el número de días/año de desplazamiento del personal se consideró el número de días hábiles laborables en CIRCE.

FORMULARIO MOVILIDAD ECOCIUDAD VALDESPARTERA														
<p><b>Cumplimenta las celdas amarillas</b></p> <p>Rellena la información relativa a la(s) modalidad(es) de desplazamiento utilizada(s) para desplazarte entre tu domicilio de Valdespartera, tu centro de trabajo, y/o centros comerciales y de ocio de Zaragoza a lo largo del último año.</p> <p>NOTA: Si la modalidad de desplazamiento es siempre la misma, rellena los datos en MODALIDAD 1 con un % anual del 100% y deja en blanco la modalidad 2.</p>														
<p>Nº vehículos/vivienda:</p> <table border="1"> <tr> <td>Turismos</td> <td>Monovolúmenes</td> <td>Todoterreno</td> <td>Motocicletas</td> </tr> <tr> <td>Furgonetas</td> <td>Biocicletas</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>					Turismos	Monovolúmenes	Todoterreno	Motocicletas	Furgonetas	Biocicletas				
Turismos	Monovolúmenes	Todoterreno	Motocicletas											
Furgonetas	Biocicletas													
<p align="center"><b>DESPLAZAMIENTOS ENTRE TU VIVIENDA Y TU CENTRO DE TRABAJO</b></p>														
<p>MODALIDAD 1      % anual de desplazamiento (aprox) en MODALIDAD 1:</p> <table border="1"> <tr> <td>Nº de kilómetros diarios totales realizados (km/día)</td> <td>Medio de transporte utilizado</td> <td>Tipo de combustible utilizado</td> <td>Nº total de personas desplazadas (incluyéndote)</td> <td>Comentarios (opcionales)</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>					Nº de kilómetros diarios totales realizados (km/día)	Medio de transporte utilizado	Tipo de combustible utilizado	Nº total de personas desplazadas (incluyéndote)	Comentarios (opcionales)					
Nº de kilómetros diarios totales realizados (km/día)	Medio de transporte utilizado	Tipo de combustible utilizado	Nº total de personas desplazadas (incluyéndote)	Comentarios (opcionales)										
<p>MODALIDAD 2      % anual de desplazamiento (aprox) en MODALIDAD 2:</p> <table border="1"> <tr> <td>Nº de kilómetros diarios totales realizados (km/día)</td> <td>Medio de transporte utilizado</td> <td>Tipo de combustible utilizado</td> <td>Nº total de personas desplazadas (incluyéndote)</td> <td>Comentarios (opcionales)</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>					Nº de kilómetros diarios totales realizados (km/día)	Medio de transporte utilizado	Tipo de combustible utilizado	Nº total de personas desplazadas (incluyéndote)	Comentarios (opcionales)					
Nº de kilómetros diarios totales realizados (km/día)	Medio de transporte utilizado	Tipo de combustible utilizado	Nº total de personas desplazadas (incluyéndote)	Comentarios (opcionales)										
<p align="center"><b>DESPLAZAMIENTOS ENTRE TU VIVIENDA Y LOS CENTROS COMERCIALES Y DE OCIO</b></p>														
<p>MODALIDAD 1      % anual de desplazamiento (aprox) en MODALIDAD 1: 100%</p> <table border="1"> <tr> <td>Nº de kilómetros semanales realizados (hoy/semana)</td> <td>Medio de transporte utilizado</td> <td>Tipo de combustible utilizado</td> <td>Nº total de personas desplazadas (incluyéndote)</td> <td>Comentarios (opcionales)</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>					Nº de kilómetros semanales realizados (hoy/semana)	Medio de transporte utilizado	Tipo de combustible utilizado	Nº total de personas desplazadas (incluyéndote)	Comentarios (opcionales)					
Nº de kilómetros semanales realizados (hoy/semana)	Medio de transporte utilizado	Tipo de combustible utilizado	Nº total de personas desplazadas (incluyéndote)	Comentarios (opcionales)										
<p>MODALIDAD 2      % anual de desplazamiento (aprox) en MODALIDAD 2:</p> <table border="1"> <tr> <td>Nº de kilómetros semanales realizados (hoy/semana)</td> <td>Medio de transporte utilizado</td> <td>Tipo de combustible utilizado</td> <td>Nº total de personas desplazadas (incluyéndote)</td> <td>Comentarios (opcionales)</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>					Nº de kilómetros semanales realizados (hoy/semana)	Medio de transporte utilizado	Tipo de combustible utilizado	Nº total de personas desplazadas (incluyéndote)	Comentarios (opcionales)					
Nº de kilómetros semanales realizados (hoy/semana)	Medio de transporte utilizado	Tipo de combustible utilizado	Nº total de personas desplazadas (incluyéndote)	Comentarios (opcionales)										

FORMULARIO MOVILIDAD DEL PERSONAL DE CIRCE														
<p><b>Cumplimenta las celdas amarillas</b></p> <p>Nombre y Apellidos: _____</p> <p>Domicilio: Calle/número: _____ Municipio: _____</p> <p align="center"><b>¡La suma de los porcentajes de las 3 modalidades debe ser igual a 100!</b></p> <p>Rellena la información relativa a la(s) modalidad(es) de desplazamiento diario utilizada(s) para desplazarte entre tu domicilio y el CPS a lo largo del último año.</p> <p>NOTA: Si la modalidad es siempre la misma, rellena los datos en MODALIDAD 1 con un % anual del 100% y deja en blanco las modalidades 2 y 3.</p>														
<p>MODALIDAD 1      % anual de desplazamiento (aprox) en MODALIDAD 1:</p> <table border="1"> <tr> <td>Nº total de trayectos diarios (incluidas idas y vueltas)</td> <td>Nº de kilómetros de cada trayecto diario (indicar sólo si se conoce)</td> <td>Medio de transporte</td> <td>Tipo de combustible utilizado</td> <td>Nº total de personas de CIRCE desplazadas (incluyéndote)</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>					Nº total de trayectos diarios (incluidas idas y vueltas)	Nº de kilómetros de cada trayecto diario (indicar sólo si se conoce)	Medio de transporte	Tipo de combustible utilizado	Nº total de personas de CIRCE desplazadas (incluyéndote)					
Nº total de trayectos diarios (incluidas idas y vueltas)	Nº de kilómetros de cada trayecto diario (indicar sólo si se conoce)	Medio de transporte	Tipo de combustible utilizado	Nº total de personas de CIRCE desplazadas (incluyéndote)										
<p>MODALIDAD 2      % anual de desplazamiento (aprox) en MODALIDAD 2:</p> <table border="1"> <tr> <td>Nº total de trayectos diarios (incluidas idas y vueltas)</td> <td>Nº de kilómetros de cada trayecto diario (indicar sólo si se conoce)</td> <td>Medio de transporte</td> <td>Tipo de combustible utilizado</td> <td>Nº total de personas de CIRCE desplazadas (incluyéndote)</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>					Nº total de trayectos diarios (incluidas idas y vueltas)	Nº de kilómetros de cada trayecto diario (indicar sólo si se conoce)	Medio de transporte	Tipo de combustible utilizado	Nº total de personas de CIRCE desplazadas (incluyéndote)					
Nº total de trayectos diarios (incluidas idas y vueltas)	Nº de kilómetros de cada trayecto diario (indicar sólo si se conoce)	Medio de transporte	Tipo de combustible utilizado	Nº total de personas de CIRCE desplazadas (incluyéndote)										
<p>MODALIDAD 3      % anual de desplazamiento (aprox) en MODALIDAD 3:</p> <table border="1"> <tr> <td>Nº total de trayectos diarios (incluidas idas y vueltas)</td> <td>Nº de kilómetros de cada trayecto diario (indicar sólo si se conoce)</td> <td>Medio de transporte</td> <td>Tipo de combustible utilizado</td> <td>Nº total de personas de CIRCE desplazadas (incluyéndote)</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>					Nº total de trayectos diarios (incluidas idas y vueltas)	Nº de kilómetros de cada trayecto diario (indicar sólo si se conoce)	Medio de transporte	Tipo de combustible utilizado	Nº total de personas de CIRCE desplazadas (incluyéndote)					
Nº total de trayectos diarios (incluidas idas y vueltas)	Nº de kilómetros de cada trayecto diario (indicar sólo si se conoce)	Medio de transporte	Tipo de combustible utilizado	Nº total de personas de CIRCE desplazadas (incluyéndote)										
<p>Comentarios: _____</p>														

Figura 4.38. Formulario utilizado para la encuesta de movilidad urbana en los edificios residenciales de Valdespartera (izqda.) y en el edificio CIRCE (dcha.)

A la hora de valorar los impactos por movilidad, considerando la disponibilidad de datos en *Ecoinvent v2.0*, se asume, por un lado, el mismo impacto para turismos y monovolúmenes de gasolina, y, por el otro, el mismo impacto para turismos y monovolúmenes diesel. En ambos casos se adoptan los inventarios existentes para la flota de vehículos promedio del año 2010. En el caso de las motocicletas se consideran los datos de *IDEMAT (2001)*, debido a la carencia de inventarios en *Ecoinvent* para este tipo de vehículos. En todos los casos, además del impacto del desplazamiento se evalúa el impacto del vehículo y de las infraestructuras necesarias.

En el caso de que dos personas se desplacen en un mismo vehículo, se dividen entre dos los resultados correspondientes. Por otra parte, en caso de que existan distintas modalidades de transporte a lo largo del año se ponderan dichas modalidades con los porcentajes indicados en la encuesta. A partir de todas las hipótesis anteriores se obtienen los resultados del estudio.

#### 4.6.5.2. Resultados de la movilidad en los edificios de Valdespartera

##### 4.6.5.2.1. Parque de vehículos

En cuanto a la composición del parque de vehículos, hay que señalar que en las viviendas de Valdespartera se dispone por término medio de 1,9 vehículos privados motorizados por hogar, con un fuerte predominio de los turismos, con una media de 1,5 vehículos por hogar.

Según el Observatorio de la Sostenibilidad en España, la motorización actual en España está próxima a la media europea, situándose en torno a los 500 automóviles por cada 1.000 habitantes. En Valdespartera, considerando una ratio de 1,95 personas/hogar, esta media se sitúa en los 890 automóviles por cada 1.000 habitantes.

Conviene destacar que, por término medio, la fabricación de un automóvil conlleva un consumo de energía de 24 MWh y unas emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> de 4,24 t CO<sub>2</sub>-Eq. Esto significa que cada habitante de Valdespartera es responsable del consumo de 21,32 MWh y la emisión de 3,77 t CO<sub>2</sub>-Eq por los automóviles que posee.

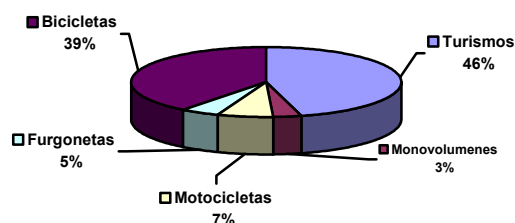


Figura 4.39. Distribución porcentual del número de vehículos en una vivienda tipo

Por otra parte, cabe destacar la disponibilidad de bicicletas, ya que el 63% de las viviendas disponen de este medio de transporte, con una media de 1,3 bicicletas por hogar, lo que contrasta con su bajo nivel de utilización para cubrir las necesidades de movilidad urbana.

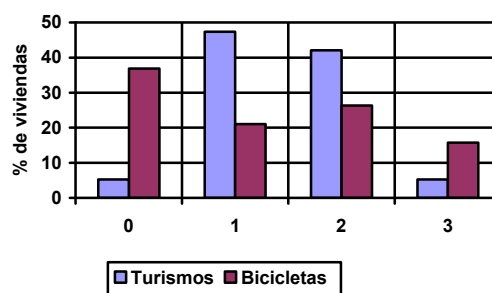


Figura 4.40. Distribución porcentual del número de turismos y bicicletas en una vivienda tipo

En la Figura 4.40 hay que aclarar, que en las viviendas que no disponen de turismos (un 5% del total), existen otros vehículos motorizados, de modo que no existe ninguna vivienda sin algún tipo de vehículo motorizado.

#### 4.6.5.2.2. Desplazamiento vivienda – trabajo

Los resultados obtenidos del análisis de los desplazamientos entre las viviendas y los lugares de trabajo muestran un uso mayoritario del vehículo privado motorizado, que supone el 81,5% del kilometraje realizado, el 18% correspondería al transporte público y tan solo un exiguo 0,5% corresponde al kilometraje realizado en bicicleta. Cabe destacar que en ningún caso el desplazamiento se hace a pie.

Según los comentarios de los propios vecinos, confirmados mediante una inspección in-situ a la urbanización, el uso de transporte público se suele descartar, debido a la mala distribución de las paradas, habiendo edificios situados a más de 10 minutos en pie de dichas paradas, y al mayor tiempo requerido para el

desplazamiento, que en algunos casos se multiplica por dos con respecto al vehículo privado.

Los ocupantes de una vivienda tipo realizan por término medio un total de 48 km/día, distribuidos tal como se indica en la siguiente figura.

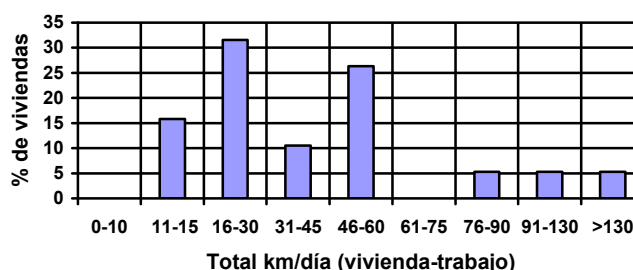


Figura 4.41. Distribución porcentual del número de kilómetros diarios totales realizados entre la vivienda y el trabajo

Además solamente el 16% de los desplazamientos en vehículo privado motorizado se hace con 2 ocupantes, mientras que en el 84% restante tan sólo hay un ocupante por vehículo, siendo el número medio de personas desplazadas de 1,16 personas/vehículo.

Una solución al problema de la movilidad sería el fomento de la multipropiedad de los vehículos por medio de empresas de “*car sharing*” (Fellows N. T., Pitfield D. E., 2000; Huwer U., 2004) que además se harían cargo del mantenimiento, seguros e impuestos, pagando los usuarios una pequeña cuota fija y una cuota variable en función del kilometraje y el tiempo de utilización del vehículo, lo que conlleva un importante ahorro económico para los usuarios. En contraste con lo que sucede con otros medios de transporte (como los aviones), los automóviles europeos permanecen parados el 95% del tiempo. Esto hace que generalmente el coste de amortización del vehículo (0,13 €/km; suponiendo un vehículo adquirido por 20.000 €, con un mantenimiento de 600 €/año y realizando 20.000 km/año durante 10 años) sea mayor al coste del combustible (en torno a 0,07 €/km), por lo que el alquiler compartido es una buena opción. Además, con este sistema se disminuyen las necesidades de parking, y por tanto se reduce sustancialmente el impacto de la edificación.

Otra opción a fomentar sería el “*car pooling*” o compartición del vehículo privado por varias personas (Teal R.F., 1987), estableciendo carriles especiales para aquellos vehículos que opten por esta modalidad de desplazamiento, de modo que al evitar atascos, se proporcionase un incentivo para su utilización.

Estas dos alternativas de movilidad ecoeficiente deberían ser impulsadas por la Administración, a través de subvenciones y/o exenciones de tasas, de modo que se consiguieran vencer las reticencias iniciales derivadas en muchas ocasiones de una marcada mentalidad hacia el concepto de la propiedad.

La siguiente tabla presenta el impacto anual en términos de energía primaria y emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> asociado a una vivienda tipo de Valdespartera. En la evaluación del impacto se considera tanto el impacto del desplazamiento en sí (que representa el 70-80% del impacto total) como el impacto asociado a la

fabricación y mantenimiento de los propios vehículos utilizados y de las infraestructuras viarias necesarias.

Medio de transporte	km/ (año*vivienda)	MJ/km	kg CO <sub>2</sub> /km	MJ/ (año*vivienda)	kg CO <sub>2</sub> / (año*vivienda)
Vehículo privado motorizado	13.105	2,994	0,172	39.236,4	2.254,1
Autobús urbano	2.895	1,671	0,104	4.837,5	301,1
TOTAL	16.000	-	-	44.073,9	2.555,1

Tabla 4.62. Impacto energético y ambiental de la movilidad vivienda-trabajo en un año

Para destacar la relevancia de dichos valores, cabe señalar que las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> asociadas a la etapa de uso de una vivienda típica de Valdespartera para cubrir sus consumos de energía y agua están entre 1.000 y 1.200 kg CO<sub>2</sub>/(vivienda y año), lo que significa que el impacto en CO<sub>2</sub> de la movilidad es más del doble que el impacto asociado al consumo de agua y energía de la vivienda. El resultado es lógico, debido a los acertados criterios de bajo consumo energético que se han impuesto en el diseño de los edificios de Valdespartera, que contrastan con la falta de consideración de criterios de movilidad.

#### 4.6.5.2.3. Desplazamiento vivienda – centros comerciales/ocio

Respecto a los desplazamientos entre las viviendas y los centros comerciales y de ocio, los resultados muestran un uso casi exclusivo del vehículo privado motorizado, que supone el 95,6% del kilometraje realizado, Tan sólo el 3% correspondería al transporte público y el 1,4% restante al kilometraje realizado en bicicleta. En este caso, la comodidad a la hora de transportar las compras realizadas, unidas a las deficiencias del transporte público señaladas anteriormente y la imposibilidad de realizar los desplazamientos a pie debido a las largas distancias a cubrir, condicionan claramente los resultados obtenidos.

Los ocupantes de una vivienda tipo realizan por término medio un total de 47 km/semana, lo que supone una cifra 7 veces menor que la obtenida para el desplazamiento entre la vivienda y el trabajo.

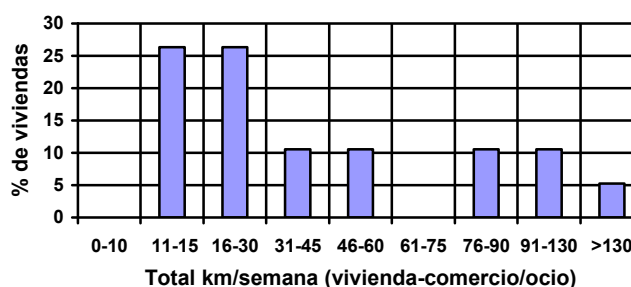


Figura 4.42. Distribución porcentual del número de kilómetros semanales totales realizados entre la vivienda y el trabajo

A diferencia de los desplazamientos vivienda-trabajo, en este caso, el 84% de los desplazamientos en vehículo privado motorizado se hace con 2 ocupantes, el 11% con un solo ocupante por vehículo y el 5% restante con 3 ocupantes, siendo el promedio de 1,95 personas desplazadas por vehículo.



La siguiente tabla presenta el impacto anual en términos de energía primaria y emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> asociado a la movilidad vivienda-comercio/ocio de una vivienda tipo de Valdespartera, considerando las mismas hipótesis señaladas anteriormente.

Medio de transporte	km/ (año*vivienda)	MJ/km	kg CO <sub>2</sub> /km	MJ/ (año*vivienda)	kg CO <sub>2</sub> / (año*vivienda)
Vehículo privado motorizado	2.157	2,994	0,172	6.458,1	371,0
Autobús urbano	68	1,671	0,104	113,6	7,1
TOTAL	2.225	-	-	6.571,7	378,1

Tabla 4.63. Impacto energético y ambiental de la movilidad vivienda-comercio/ocio en un año

A pesar de que los impactos obtenidos en este caso son del orden de 7 veces más bajos que los anteriores, siguen siendo relevantes, ya que las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> asociadas a la movilidad representan el 30-40% de las correspondientes al consumo de energía y agua durante el uso de la vivienda.

Finalmente, agregando los dos tipos de desplazamiento analizados, la energía incorporada en movilidad para cada uno de los edificios residenciales asciende a 3.038,74 GJ-Eq/año, siendo el potencial de calentamiento global de 175,99 t CO<sub>2</sub>-Eq/año.

Al incluir la movilidad dentro de los límites del ACV de los edificios residenciales, ésta supondría el 56-57% de los impactos totales del ciclo de vida tanto en energía como en emisiones.

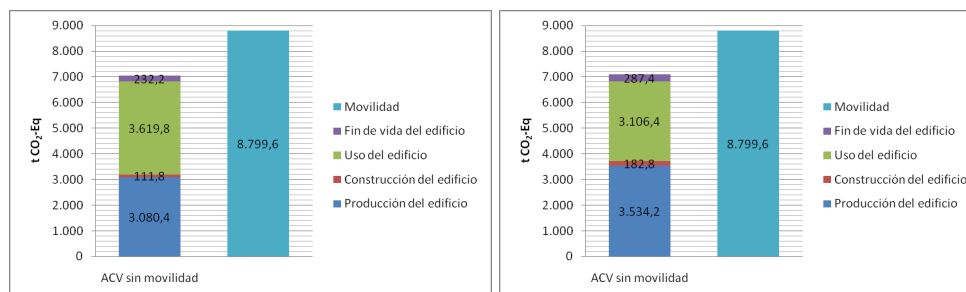


Figura 4.43. Impacto de la movilidad en el ciclo de vida del edificio residencial n° 1 (izqda.) y del edificio residencial n° 2 (dcha.), evaluados en términos de potencial de calentamiento global

De la Figura 4.43, se deduce que el impacto en emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> asociado a la movilidad es 2,4-2,8 veces mayor al impacto en la etapa de uso del edificio contabilizando los consumos de agua y energía y el mantenimiento, obteniendo ratios similares si se hiciera el análisis en términos de energía primaria incorporada.

### 4.6.5.3. Resultados del edificio CIRCE

#### 4.6.5.3.1. Desplazamiento vivienda – trabajo

La siguiente gráfica muestra gráficamente las líneas de movilidad de los ocupantes del edificio CIRCE entre su domicilio y el propio edificio, obtenidas a partir de las encuestas realizadas.



Figura 4.44. Desplazamientos del personal de CIRCE entre su domicilio y el edificio CIRCE

Los resultados evidencian que la distancia del domicilio al edificio CIRCE condiciona el medio de transporte. De este modo, el desplazamiento a pie solo se realiza mayoritariamente en distancias cortas, el desplazamiento en bicicletas y autobús urbano se realiza siempre que la distancia a recorrer sea inferior a 10 km, mientras que el desplazamiento en turismos, motocicletas y monovolúmenes predomina en distancias medias-largas.

Distancia al domicilio (km)	Medio de transporte						
	A pie	Autobús	Bicicleta	Monovolumen	Motocicleta <=125cc	Motocicleta >125cc	Turismo
0-2	90,04%	0%	6,59%	0%	0%	0%	0,04%
2-5	9,96%	23,01%	19,26%	22,59%	0%	0%	4,92%
5-10	0%	76,99%	74,15%	77,41%	59,09%	100%	35,75%
10-20	0%	0%	0%	0%	40,91%	0%	24,65%
>20	0%	0%	0%	0%	0%	0%	34,64%
TOTAL	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabla 4.64. Tipo de vehículo utilizado en función de la distancia del domicilio al edificio CIRCE

Respecto al tipo de combustible utilizado, la mayor parte de los desplazamientos (63%) conlleva el consumo de gasóleo A (diesel), frente al 27,5% de consumo de gasolina. Cabe destacar que el 9,4% de los desplazamientos no supone ningún consumo de combustible al tratarse de trayectos realizados en bicicleta o a pie.

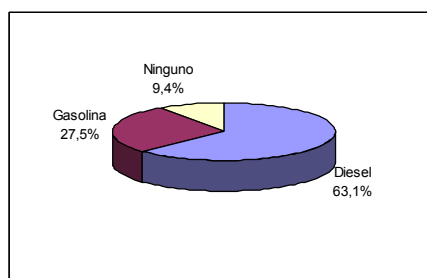


Figura 4.45. Distribución porcentual de los kilómetros anuales por tipo de combustible utilizado

La siguiente tabla muestra la distribución porcentual del número de trayectos diarios realizados por el personal del edificio en función de la distancia de su domicilio al edificio CIRCE. Si bien la mayor parte del personal realiza 2 trayectos diarios (ida y vuelta), cabe destacar que para pequeñas distancias (0-2 km) la mayoría realiza 4 trayectos diarios.

Distancia al domicilio (km)	Número de trayectos diarios		
	2	3	4
0-2	14,81%	11,11%	74,07%
2-5	56,41%	23,08%	20,51%
5-10	50%	13,64%	36,36%
10-20	75%	0%	25%
>20	22,22%	33,33%	44,44%
TOTAL	46,55%	15,52%	37,93%

Tabla 4.65. Promedio total de trayectos diarios realizados según la distancia al domicilio

Como muestra la siguiente figura, la mayor parte del personal realiza trayectos diarios cortos: el 58% del personal hacen entre 5 y 20 km/día, siendo la distancia media recorrida por cada trabajador de 13,5 km/día.

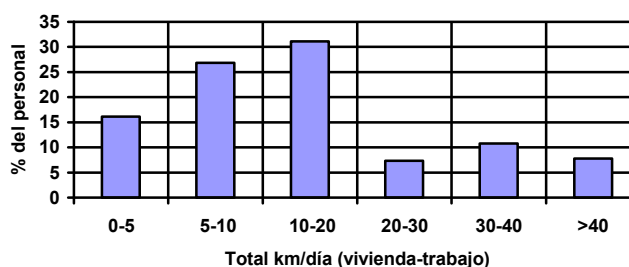


Figura 4.46. Distribución porcentual del número de kilómetros diarios totales realizados entre el domicilio y el edificio CIRCE

Conviene destacar que tan solo en el 2% de los desplazamientos, 2 trabajadores del edificio CIRCE se trasladan en un mismo vehículo. En el 98% restante, los desplazamientos se hacen de forma individual.

Finalmente, la siguiente tabla muestra el número de kilómetros anuales según el medio de transporte utilizado. La mayor del kilometraje (68,2%) se realiza mediante turismo -con motor diesel mayoritariamente-, el 14,4% se realiza en autobús urbano, el 8% en bicicleta, el 4,6% en motocicleta, el 3,4% en monovolumen y tan solo el 1,4% se realiza a pie. En definitiva, el 76,2% del

kilometraje total corresponde a vehículos privados motorizados. El número total de kilómetros anuales realizados asciende a 292.939 km/año, lo que supone una media de 4.507 km por persona y año.

Medio de transporte	Kilómetros anuales	Porcentaje
Turismo	199.855,35	68,2%
- Turismo Diesel	132.791,10	45,3%
- Turismo Gasolina	67.064,25	22,9%
Autobús	42.205,40	14,4%
Bicicleta	23.450,20	8,0%
Monovolumen	10.021,20	3,4%
- Monovolumen Diesel	9.791,70	3,3%
- Monovolumen Gasolina	229,50	0,1%
Motocicleta <=125cc	6.956,70	2,4%
Motocicleta >125cc	6.405	2,2%
A pie	4.044,80	1,4%
TOTAL	292.938,65	100%

Tabla 4.66. Número total de kilómetros anuales por tipo de vehículo

Las siguientes gráficas desagregan el reparto del impacto en energía incorporada y potencial del calentamiento global asociado a la movilidad de los ocupantes. Cabe destacar el elevado impacto global del vehículo privado diesel, que es el medio de transporte predominante entre los ocupantes del edificio.

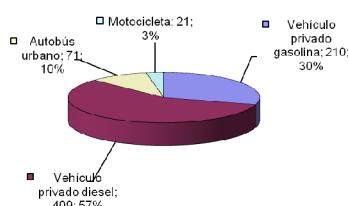


Figura 4.47. Distribución del impacto en energía incorporada (en GJ-Eq/año y %) en la movilidad de los ocupantes

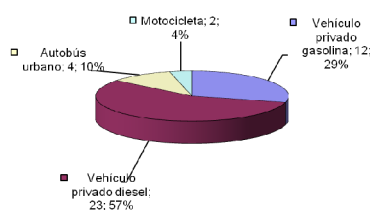


Figura 4.48. Distribución del impacto en potencial de calentamiento global (en t CO<sub>2</sub>-Eq/año y %) en la movilidad de los ocupantes

En total, la energía incorporada asociada a la movilidad asciende a 710,16 GJ-Eq/año, siendo el potencial de calentamiento global de 41,53 t CO<sub>2</sub>-Eq/año.

Tal como muestra la Figura 4.49, el impacto en emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> asociado a la movilidad es 2,3 veces mayor al impacto en la etapa de uso del edificio contabilizando los consumos de agua y energía y el mantenimiento.

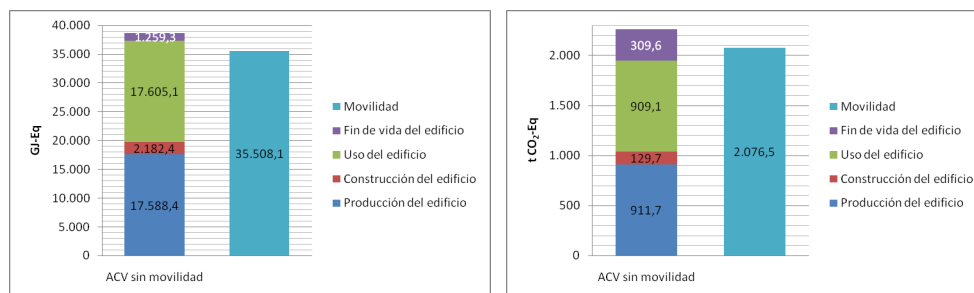


Figura 4.49. Impacto de la movilidad en el ciclo de vida del edificio CIRCE, evaluado en términos de energía incorporada (izqda.) y potencial de calentamiento global (dcha.)

Por tanto, incluyendo la movilidad dentro de los límites del ACV del edificio CIRCE, ésta supondría el 48% del potencial de calentamiento global del edificio. Cifras similares se obtienen al hacer el análisis en términos de energía primaria incorporada.

#### 4.7. Conclusiones

En este capítulo se ha propuesto una adaptación de los estándares metodológicos del ACV: ISO y CEN/TC 350 para su aplicación en edificios, aplicando la metodología propuesta a tres edificios de bajo consumo energético. De este modo, se han identificando y evaluado comparativamente las etapas y aspectos de mayor impacto de dichos edificios desde una perspectiva global.

En este sentido, conviene hacer notar que puede existir cierta variabilidad en las ratios de impacto correspondientes a los distintos aspectos que forman la vida útil de los edificios, dependiendo de las fuentes de datos utilizadas, los límites establecidos, las soluciones y materiales constructivos empleados, la ubicación y función de de los edificios, etc.

Tal como muestra la siguiente figura, los impactos indirectos de la edificación son mayores que los impactos directos en los que se centra la normativa edificatoria actualmente. Considerando el promedio de los edificios residenciales analizados, la energía primaria incorporada total asciende a 321,8 kWh/m<sup>2</sup> y año. El 57% de este valor corresponde a la movilidad urbana de los ocupantes, el 23% al consumo directo de agua y energía, el 17% a la fabricación de los materiales y equipamientos del edificio, correspondiendo el 3% restante a la construcción, mantenimiento y fin de vida del edificio.

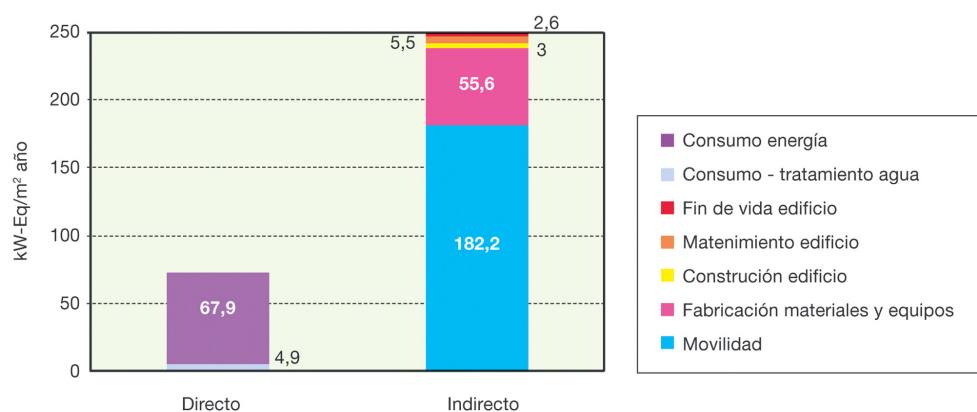


Figura 4.50. Energía primaria anualizada directa e indirecta en los edificios residenciales

Repitiendo el análisis en términos de potencial de calentamiento global, se obtiene un valor promedio de 68,5 kg CO<sub>2</sub>-Eq/m<sup>2</sup> y año para los edificios residenciales, con un reparto del impacto similar al anterior: movilidad (55%), materiales y equipos (21%), agua y energía (20%) y otros aspectos (4%).

Dicho en otras palabras, el 77-80% del impacto energético y en emisiones de los edificios residenciales se debe a impactos indirectos, no considerados en la normativa de eficiencia energética edificatoria, y que como consecuencia de ello, tendrán una repercusión creciente en el tiempo, a medida que la normativa consiga que los impactos directos vayan disminuyendo progresivamente.

Es evidente que en un edificio construido en la década de los 60 que no haya sido rehabilitado, los impactos no se repartirán del modo expuesto anteriormente, siendo el consumo de agua y energía mucho mayor que la energía incorporada en los materiales, ya que seguramente el edificio tendrá un coeficiente global de pérdidas muy elevado. Por ello, al seleccionar en este capítulo edificios de bajo consumo energético se pretende vislumbrar cuáles serán los impactos de los nuevos edificios o de los edificios rehabilitados para poder proponer nuevas soluciones que con el tiempo tendrán que incorporarse a la normativa.

Se ha observado que el impacto global del ciclo de vida, considerando el potencial de calentamiento global del ciclo de vida global expresado en kg CO<sub>2</sub>-Eq por m<sup>2</sup> y año e incluyendo la movilidad, es un 28% inferior en el edificio CIRCE que en los edificios residenciales. A pesar de esta importante reducción, las cifras obtenidas indican la complejidad de conseguir un edificio de cero emisiones de ciclo de vida, por lo que este estándar debe contemplarse como un ambicioso reto a conseguir que además permite identificar situaciones en las que se consiguen mejoras aparentes, que en realidad pueden incluso incrementar los impactos a nivel global.

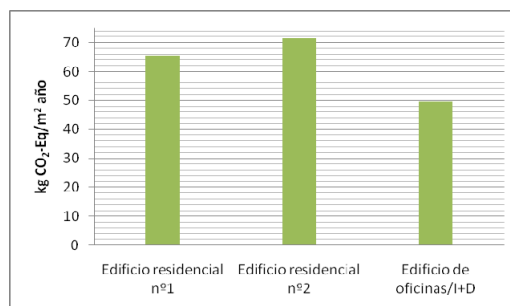


Figura 4.51. Impacto del potencial de calentamiento global del ciclo de vida global en los tres edificios analizados

A pesar de la gran cantidad de datos y cálculos que se requieren para poder desarrollar un estudio completo de ACV en un edificio, en base al anterior reparto de los impactos entre las distintas etapas del ciclo de vida del edificio, se ha comprobado que es posible proponer una metodología simplificada de ACV que permita reducir los datos y cálculos necesarios, reduciendo asimismo el tiempo requerido para llevar a cabo el estudio, lo que resulta esencial de cara a conseguir una universalización en el uso del ACV entre los agentes del sector de la construcción.

En este capítulo, se ha demostrado que, obviando los impactos a nivel de urbanización, es posible dejar fuera de los límites del sistema, especialmente en edificios residenciales, las etapas de construcción y fin de vida; limitando el sistema a analizar a la fabricación de la estructura y cerramientos del edificio y al consumo de energía final necesario para la operación del edificio. De este modo, tan sólo es preciso extraer del proyecto arquitectónico del edificio, todos los materiales, capa a capa, (con sus espesores) de la envolvente del edificio y la superficie total de cada tipo de muro, así como el material y el peso de la estructura, extrayendo asimismo del proyecto de climatización del edificio, los consumos de energía final desglosados por fuente de energía (gas natural, fueloil, gasóleo, electricidad, etc.) para calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria e iluminación.

Para conseguir una disminución efectiva de los impactos del ciclo de vida de los edificios, la fase del diseño edificatorio es fundamental, puesto que los resultados obtenidos afectarán a más de una generación. De los estudios realizados en este capítulo se deduce que el mayor impacto energético y medioambiental se concentra principalmente en las etapas de producción y uso del edificio.

La etapa de construcción sólo será relevante en aquellos casos en que el peso de los materiales del edificio sea elevado como consecuencia, por ejemplo, del uso de materiales de alta densidad o del diseño de edificios de alta inercia térmica, donde se incrementa sustancialmente la masa de los muros. En cualquier caso, la reducción de los consumos obtenida en este tipo de diseños a lo largo de toda la vida útil compensa el mayor impacto de su transporte.

Por su parte, los procesos on-site de construcción, donde predomina el consumo de gasóleo asociado a la maquinaria de construcción necesaria para el movimiento de tierras suelen ser despreciables, por lo que únicamente se podrían considerar en terrenos cuya orografía o composición conlleve un movimiento de tierras importante.

El impacto asociado a los residuos de construcción generados durante la obra es mínimo por varios motivos: por un lado, hay que destacar que se trata de pequeñas cantidades, que representan habitualmente menos del 2% del peso total de los materiales de construcción utilizados, y por el otro, hay que considerar que se trata de residuos que se suelen valorizar y que, en caso de que terminen en un vertedero, su carácter inerte hace que el impacto en esta etapa sea reducido.

En cuanto a la etapa de fin de vida, su impacto sólo será significativo para aquellos materiales cuya disposición final sea la incineración, especialmente si no conlleva una valorización. En el caso de los materiales de origen biomásico a incinerar, las emisiones producidas se compensan con la absorción de emisiones que tiene lugar en la etapa de producción, por lo que globalmente su impacto es prácticamente nulo, siempre y cuando no hayan sido sometidos a numerosos procesos industriales para su tratamiento. Por ello, debería evitarse en la medida de lo posible la incineración de materiales que lleven asociado un elevado procesado industrial, como por ejemplo, el poliestireno, pero también de los materiales de origen biomásico, ya que, de este modo, dichos materiales pueden producir una absorción neta de CO<sub>2</sub> en el ciclo de vida que mejore sustancialmente el impacto del edificio. En cualquier caso, conviene señalar la incertidumbre asociada a la etapa de fin de vida, puesto que conlleva hacer estimaciones en el momento actual de cuál será la disposición habitual de los materiales del edificio después de un periodo de más de 50 años, que es la vida útil que se suele dar al edificio.

Dentro de la etapa de producción del edificio, el impacto mayor se suele concentrar en un elemento de vital importancia como es el forjado, que constituye un cerramiento interno entre las distintas plantas del edificio y entre el edificio y el terreno, a la vez que forma parte de la estructura que garantiza la solidez del edificio a lo largo de toda su vida útil. El alto impacto del forjado se debe principalmente al uso de hormigón armado y, en mucha menor medida, dependiendo del tipo de forjado, al poliestireno que puede llevar incorporado.

Se ha demostrado que la estructura de los edificios es uno de los aspectos que más contribuyen a aumentar su impacto total. De hecho en edificios que dispongan de más de 1 planta de aparcamiento subterráneo, la estructura puede llegar a suponer, excluyendo la movilidad, hasta el 35% del impacto energético del ciclo de vida, siendo el hormigón armado que las constituye responsable de hasta el 75% de la energía incorporada en los materiales y equipamientos del edificio. Por ello, se debería aligerar todo lo posible el edificio, minimizando el uso de materiales y priorizando aquellos materiales de menor peso, de modo que se pueda reducir la estructura necesaria sin reducir la seguridad o la vida útil del edificio ni perjudicar el comportamiento térmico de la envolvente del edificio. Asimismo, el uso de estructuras de madera contribuiría a reducir significativamente los impactos, al poder contabilizar el CO<sub>2</sub> absorbido durante su crecimiento en el bosque, que además permanecería almacenado durante más de 50 años. No obstante, hay que considerar la imposibilidad de que esta solución se pueda extender a todos los edificios, ya que podría producirse un efecto rebote indeseado como consecuencia de la destrucción de masa arbórea, producida por un uso masivo de la madera como elemento estructural.

Otra solución para reducir el impacto de la estructura es la utilización de árido reciclado procedente de la demolición de obras de modo que sea posible la sustitución, al menos parcialmente, del hormigón nuevo. A pesar de que todavía es preciso desarrollar técnicas innovadoras que permitan reutilizar el hormigón armado, separando de un modo eficaz el acero del hormigón, existen ya algunas



experiencias al respecto, por lo que se debería fomentar la I+D en este ámbito. Asimismo otra posible solución sería incentivar una producción más sostenible del clínker, de acuerdo con los criterios expuestos en el capítulo 3.

Otro elemento que suele tener un cierto impacto son los muros exteriores, sólo que a diferencia del caso anterior, su impacto puede verse claramente atenuado, pudiendo llegar a obtener muros, que en términos globales y en función de los materiales seleccionados en el diseño del muro, sean capaces de disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Comparando el impacto de los muros exteriores de los dos edificios residenciales analizados, se deduce que para disminuir el impacto de dichos muros conviene sustituir los aislantes convencionales como la fibra de vidrio por aislantes naturales, como el corcho o la arlita, combinados con bloques de arcilla aligerada, evitando asimismo los cada vez más utilizados revestimientos metálicos a base de placas de acero galvanizado, que aumentan sustancialmente los impactos con respecto a los revestimientos de mortero monocapa o a los ladrillos caravista. De hecho, el impacto de un revestimiento metálico para fachada se estima en 1.583 MJ-Eq/m<sup>2</sup> y 94 kg CO<sub>2</sub>-Eq/m<sup>2</sup>.

Cabe destacar la reducida fracción renovable (habitualmente inferior al 5%) en la energía incorporada durante la fabricación de los materiales de construcción que forman parte de la estructura, forjados y cubiertas. Tal como ha quedado demostrado, el uso de materiales de construcción de origen biomásico en los huecos (puertas y ventanas) y los muros exteriores contribuye a aumentar la fracción renovable asociada a la producción del edificio, que puede llegar a multiplicarse por un factor entre 2 y 3 dependiendo de los materiales seleccionados en el diseño del edificio, disminuyendo además la contribución al potencial de calentamiento global y la puntuación total del Ecoindicador '99.

El impacto energético asociado a la fabricación de los equipos de generación (calderas, bombas de calor, lámparas de iluminación, captadores solares térmicos, paneles fotovoltaicos y aerogeneradores) es despreciable frente a la energía que producen a lo largo de toda su vida útil. Por ejemplo, la energía necesaria para la fabricación de una caldera de calefacción supone el 8% de la energía primaria asociada al equipo a lo largo de toda su vida útil, correspondiendo el 92% restante a la energía primaria requerida para la generación térmica durante el funcionamiento de la caldera, de modo que en tan solo 2 años se habrá consumido la misma energía primaria requerida para su producción. En este caso, los impactos asociados al transporte de la caldera son despreciables, debido a su reducido peso en comparación con otros elementos del edificio. Asimismo, el impacto de su disposición final es mínimo, ya que la mayor parte de los elementos que la constituyen se reciclan. Por otra parte, en el caso de los captadores solares térmicos, en algo menos de 1 año habrán aportado la misma cantidad de energía que se ha necesitado para su producción.

De todo lo anterior, se desprende que el impacto asociado al reemplazo de los equipos energéticos que forma parte del mantenimiento dentro de la etapa de uso del edificio tiene una repercusión pequeña, al igual que el reemplazo de puertas y ventanas, ya que representan una mínima parte de los materiales del edificio.

Respecto a las lámparas de iluminación, conviene remarcar el impacto ambiental de las denominadas lámparas de bajo consumo, que a partir de 2012 reemplazarán a las bombillas incandescentes tradicionales en los hogares europeos. Además de cuestionar su idoneidad para aplicaciones que conlleven un régimen de uso con numerosos encendidos y apagados, lo que hace que su duración sea muy inferior a

la indicada por el fabricante, hay que tener presente que cada bombilla de bajo consumo contiene alrededor de 4 mg de mercurio, material tóxico con un elevado poder contaminante. Si bien esta cantidad se viene reduciendo cada vez más, hay que señalar que, en caso de que estas bombillas no sean adecuadamente recicladas mediante su traslado por parte de los consumidores a los correspondientes centros de venta o distribución o bien a los puntos limpios de recogida selectiva, se producirá un claro perjuicio para la salud humana y el medioambiente. Puesto que en la actualidad la tasa de reciclaje de lámparas en España es aproximadamente del 33%, es imprescindible incrementar dicha tasa, mediante campañas de concienciación específicamente dirigidas a los usuarios.

La disminución de los consumos de iluminación que, excluyendo la movilidad, pueden representar el 10-15% de los impactos energéticos del ciclo de vida, pasa por la progresiva implantación de las lámparas LED (*Lighting Emitting Diode*) para sustituir las lámparas incandescentes o halógenas, en detrimento de las lámparas de bajo consumo. Las ventajas de las lámparas LEDs son evidentes: no contienen mercurio al estar constituidas por materiales semiconductores inorgánicos, tienen una eficiencia luminosa 6 veces mayor que las incandescentes tradicionales y muy similar a las lámparas de bajo consumo, pero a diferencia de éstas últimas su arranque es instantáneo y su vida útil puede llegar a alcanzar las 50.000 horas de funcionamiento, pudiendo trabajar tanto en alterna como en continua, y consiguiendo una menor dispersión de la luz y un flujo luminoso regulable. A día de hoy, el único inconveniente es su mayor coste (entre 45 y 70 € por lámpara), pero su progresiva implantación propiciará por economía de escala una gradual reducción del mismo. Asimismo la incorporación de dispositivos de control como interruptores horarios, temporizadores, células fotoeléctricas y detectores de presencia, puede llegar a reducir, dependiendo de cada caso concreto, hasta en un 15% el consumo de energía final para iluminación.

Durante el uso de los edificios, hay que remarcar el fuerte impacto indirecto asociado a la movilidad de sus ocupantes, que tal como se ha mencionado puede llegar a suponer algo más de la mitad del consumo energético y de las emisiones producidas en toda la vida útil del edificio. Los resultados evidencian que las grandes distancias existentes entre las zonas residenciales, los lugares de trabajo y las zonas comerciales y de ocio, que son consecuencia directa del modelo urbanístico que se ha seguido, condicionan el medio de transporte de la población. De este modo el desplazamiento a pie solo se realiza en distancias cortas, el desplazamiento en bicicletas y autobús urbano se realiza en distancias inferiores a 10 km, mientras que el desplazamiento en vehículos privados motorizados es mayoritario en distancias superiores. En general, se observa un uso masivo de este tipo de vehículos en los núcleos urbanos, siendo responsable del 76-82% del kilometraje realizado en los desplazamientos diarios vivienda-trabajo y del 96% del kilometraje realizado en los desplazamientos semanales vivienda-centros comerciales/ocio. La cada vez mayor disponibilidad de bicicletas en muchas ciudades españolas pone de manifiesto que actualmente este vehículo se está utilizando más como un elemento de recreo que como una alternativa de movilidad urbana, tal como sería deseable.

El impacto indirecto de la edificación asociado a la movilidad urbana de los habitantes es más del doble que el impacto directo asociado al consumo energético de climatización e iluminación y al consumo de agua. Además esta situación se acrecentará en el futuro, debido a las cada vez mayores exigencias normativas centradas en la disminución de los consumos de energía y agua en el uso cotidiano de los edificios.

Este es un aspecto esencial, a pesar de que en los estudios de ciclo de vida los requisitos de movilidad que están fuertemente condicionados por la ubicación del edificio suelen dejarse fuera de los límites del sistema a analizar. Es obvio que dicha movilidad no se produciría si el edificio no existiese, por lo que, sin duda alguna, deberían contabilizarse dentro de los impactos causados por el edificio. Este hecho es todavía más relevante en el caso de edificios en los que su ubicación no está predeterminada y es posible seleccionar distintas ubicaciones durante la fase inicial de planeamiento. En esos casos, la realización de un estudio que optimice la ubicación, minimizando los nuevos requisitos de movilidad ocasionados, puede conllevar una disminución de los impactos muy superior a la que se conseguiría, por ejemplo, optimizando el espesor de aislamiento.

La reducción de la movilidad conlleva apostar por los diseños urbanísticos compactos, tradicionales de la civilización mediterránea, donde los lugares de trabajo, residencia, comercios y zonas de ocio se encuentren agrupados entre sí dentro de los municipios, corrigiendo la actual tendencia hacia un urbanismo disperso, donde los edificios dedicados al ocio y al trabajo se ubican en el extrarradio de los municipios, lo que obliga al desplazamiento desde las zonas residenciales, que además se diseñan básicamente como una mera agrupación de bloques de viviendas con un nivel mínimo de servicios alrededor.

Otras medidas de gran interés para solucionar el creciente problema de la movilidad son el impulso desde la Administración, por medio de subvenciones, reducciones o exenciones de tasas a las empresas de “*car sharing*” y el fomento del “*car pooling*”, especialmente en aquellos polígonos industriales, parques tecnológicos y centros de trabajo en general más alejados de las zonas residenciales, facilitando carriles rápidos especiales para los vehículos que se acojan a esta modalidad.

Estas dos alternativas de movilidad ecoeficiente deberían ser impulsadas por la Administración, a través de subvenciones y/o exenciones de tasas, de modo que se consiguieran vencer las reticencias iniciales derivadas en muchas ocasiones de una marcada mentalidad hacia el concepto de la propiedad.

Por otra parte, las crecientes necesidades de movilidad llevan a que cada vez se incluya un mayor número de plazas de aparcamiento subterráneo en los edificios residenciales, lo que a su vez aumenta considerablemente el impacto asociado a la estructura del edificio tal como se demuestra al comparar los 2 edificios residenciales analizados, que cuentan con 1 y 2 plantas de aparcamiento respectivamente.

Además del impacto de la movilidad, en la etapa de uso destacan los impactos asociados a los consumos de energía para la calefacción, refrigeración e iluminación del edificio. En términos de energía final, en la zona climática analizada (Zaragoza), el mayor consumo se produce para calefacción y agua caliente sanitaria, seguido del consumo en refrigeración e iluminación. Sin embargo, en términos de energía primaria, la refrigeración y la iluminación tienen un impacto mayor que la calefacción y el agua caliente. Ello se explica por el tipo de energía consumida en cada servicio: energía eléctrica en baja tensión para la refrigeración e iluminación, y gas natural para la calefacción y el agua caliente. Por tanto, sus factores de paso de energía final a energía primaria, considerando la eficiencia energética en todo el proceso y las infraestructuras necesarias para hacer llegar la energía al punto de consumo, son sustancialmente distintos: 3,2 para la

electricidad y 1,23 para el gas natural, reduciéndose ambos factores de paso en torno a un 18% si se eliminan las infraestructuras del análisis.

Las energías renovables integradas en la edificación son una solución para disminuir todos estos consumos energéticos directos. En la actualidad, la normativa ha propiciado que los edificios estén continuamente conectados a las redes energéticas, consumiendo directamente de las mismas, vendiendo su producción eléctrica renovable a la red y reduciendo puntualmente los consumos mediante captadores solares térmicos, intercambios geotérmicos, etc. Lo deseable sería dar la vuelta a esta situación, e intentar conseguir el autoabastecimiento energético del edificio utilizando los recursos renovables locales y autóctonos disponibles en cada zona, supliendo a través de las redes energéticas solamente los déficits puntuales que se puedan producir. Con ello se dispondría de una mayor autonomía energética, y por tanto de una mayor independencia.

Finalmente, dentro de la etapa de uso, cabe destacar el impacto asociado al consumo de agua potable en el uso de los edificios. Si bien en términos de energía incorporada, potencial de calentamiento global o puntuación total del Ecoindicador 99 su impacto es poco relevante, la producción de agua potable supone en torno al 80% de la huella hídrica del edificio, que se concentra principalmente (90%) en la etapa de uso.

Mientras, la ONU afirma que un consumo de agua sostenible en los hogares no debería exceder los 55 litros por persona y día, las cifras actuales en España duplican o incluso triplican dicho valor. Puesto que el agua es un recurso vital con un alto valor económico, ecológico y social, resulta obligado plantear medidas para preservarla: en primer lugar, no se debería emplear agua potable para todos los usos, por lo que se deberían diseñar edificios con redes separativas de distribución de agua potable y agua gris reutilizada y con redes separativas de recogida de aguas que faciliten un tratamiento diferenciado para las aguas grises y las aguas negras. Con ello se conseguiría disminuir tanto las necesidades de tratamiento de las aguas residuales como el consumo de agua potable. Además se debería considerar la instalación de sencillos dispositivos que redujeran los consumos de agua tales como aireadores o perlizadores en los grifos, cisternas de doble descarga, así como promover una mayor concienciación de los usuarios por medio de campañas divulgativas.

Se debería impulsar una nueva normativa estatal que permita cubrir el vacío legal existente, obligando a la incorporación de sistemas de gestión y reutilización de las aguas de lluvia en el diseño de nuevos edificios y rehabilitaciones (especialmente en zonas de alta pluviometría) para todos los usos domésticos compatibles, como el riego de la parcela, el agua de limpieza, la cisterna del inodoro, e incluso la lavadora y el lavavajillas, reduciendo el consumo de detergente debido a la menor dureza del agua. Además la infraestructura necesaria es muy simple, incluyendo cubierta, canalón, filtro, depósito de almacenamiento de agua filtrada, bomba de distribución del agua almacenada y sistema de drenaje de excedentes, a lo que se puede añadir un sistema que deseche automáticamente el primer agua caída, que contiene una mayor suciedad. Según AEMET, la precipitación media anual en España es de 650 mm, por lo que una cubierta de 100 m<sup>2</sup> podría llegar a proporcionar 52.000 litros de agua de lluvia al año, suponiendo un aprovechamiento típico del 80%.

Del mismo modo, la normativa debería obligar a la reutilización de aguas grises procedentes de duchas, bañeras, lavabos o bidés para poder cubrir la demanda de

agua de las cisternas de los inodoros, limpieza de exteriores, así como las posibles necesidades de riego de la parcela, satisfechas habitualmente con agua potable, con los altos impactos que ello conlleva. En una vivienda de 4 personas, reutilizando las aguas grises para las cisternas de los inodoros se obtendría un ahorro de 30 litros por persona y día (suponiendo 5 usos/persona y 6 l/uso), o lo que es lo mismo 120 litros/día por vivienda, que representa el 30% del consumo de agua diario de dicha vivienda. La infraestructura asociada constaría simplemente de tuberías independientes desde los desagües de los sanitarios hasta los depósitos de depuración, donde se eliminan las partículas sólidas y se somete a cloración dosificada, y desde allí se llevaría hacia los puntos de uso. Para una vivienda unifamiliar de nueva construcción, el sobrecoste estimado sería de 1.200 €. Por otra parte, la incorporación de trampas de grasa, “filtros jardinera” impermeables y “filtros de acolchado” a base de cortezas, hojas, etc.; permitiría reutilizar hasta en un 70% las aguas grises (que poseen altos contenidos nutritivos) para el riego.

En definitiva la reutilización de aguas grises y la reutilización de pluviales, podría llegar a cubrir más del 50% del actual consumo de agua en el uso de los edificios, permitiendo alcanzar un valor de consumo de agua sostenible.

Con respecto a los indicadores de impacto seleccionados, se puede concluir que a pesar de la actual falta de consenso entre la comunidad científica respecto a los factores de normalización y ponderación más adecuados para el método Ecoindicador 99, en el que solamente los resultados de la caracterización tienen un consenso generalizado, en los edificios analizados la puntuación única se convierte en un indicador que puede aglutinar -al menos de un modo cualitativo- el impacto energético y ambiental de los edificios, permitiendo realizar análisis comparativos.

Se ha observado que utilizando este indicador, las etapas de construcción y de fin de vida adquieren un mayor peso en el impacto total, respecto al peso que tienen con otros indicadores. Esto es lógico ya que el impacto de estas dos etapas no está tanto en la energía requerida o la huella de carbono, sino en otros aspectos medioambientales incluidos en el ecoindicador, como por ejemplo las emisiones de partículas que tienen lugar durante la construcción y el derribo de los edificios, la inutilización del suelo ocupado por los edificios, así como por vertederos e incineradoras para otro tipo de usos, las posibles emisiones de SO<sub>2</sub> en incineradoras, etc.

Finalmente conviene recordar la pérdida de productividad primaria neta que se produce al edificar. Esta circunstancia se ha hecho especialmente patente en las últimas décadas en el litoral sudeste de la península. En esta zona, grandes extensiones de tierra muy fértil tradicionalmente utilizada como huertas ha dado paso a la especulación masiva, convirtiéndose en grandes complejos residenciales para uso turístico y por tanto, con un elevado porcentaje de infrautilización a lo largo del año. Esta circunstancia es especialmente negativa en las proximidades de la costa, donde la expansión edificatoria durante las últimas décadas ha contribuido al agotamiento de los acuíferos en determinadas zonas, favoreciendo la entrada de agua marina y produciendo, por tanto, una salinización de los terrenos, reduciendo así su productividad agrícola. Una posible solución a esta problemática sería la promulgación de una nueva normativa que establezca límites a la conversión de suelo agrícola en suelo a edificar a partir de unos índices de fertilidad determinados.

Asimismo se deberían establecer límites a la construcción de edificios en zonas donde el terreno no presente las características geotécnicas adecuadas, como por

ejemplo, en zonas inundables y lechos secos de ríos donde exista agua a poca profundidad, en zonas con fallas geológicas, en suelos arcillosos de poca resistencia, etc. En todos estos casos, el ya significativo impacto de la estructura de los edificios se verá fuertemente incrementado, sin llegar a asegurar con total fiabilidad que en un plazo de tiempo de 10-20 años sea preciso volver a reforzar nuevamente dicha estructura debido a la aparición de grietas en los cerramientos, incrementando una vez más los impactos del ciclo de vida. Como ha quedado demostrado, a través del edificio de oficinas/I+D analizado, las malas propiedades del terreno pueden llegar a incrementar la energía incorporada por m<sup>2</sup> y año en los materiales del edificio hasta en un 29%, debido a la necesaria incorporación de una losa de hormigón armado de más de 1.000 m<sup>3</sup> sobre una capa de zahorras compactadas de más de 10.000 t. Además puesto que en conjunto suponen el 88% del peso del edificio son responsables directos de la mayor parte del impacto del transporte planta-obra. En este sentido, los suelos rocosos serían los más aconsejables de cara a minimizar el impacto de la estructura de los edificios.

## CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN DE MEDIDAS DE ECOEFICIENCIA PARA EL SECTOR DE LA EDIFICACIÓN RESIDENCIAL EN ESPAÑA

En este capítulo se realiza una evaluación cuantitativa -en base a la metodología de análisis de ciclo de vida ya definida en el capítulo anterior- del potencial de ahorro en España, en términos de energía primaria y de disminución del calentamiento global potencial, asociado a la puesta en marcha de un conjunto de medidas en edificios residenciales, tanto nuevos como ya existentes. Asimismo se hace una estimación de la inversión necesaria para garantizar la aplicación de dichas medidas.

La mayor parte de las medidas cuantificadas son aplicables a cualquier tipo de edificación. No obstante, para posibilitar una correcta extrapolación de los resultados al conjunto del parque edificatorio nacional, se analizará exclusivamente el impacto de dichas medidas sobre edificios de uso residencial, debido a su mayor homogeneidad.

Para ello se han seleccionado dos tipologías de edificios representativos del sector residencial en España: vivienda unifamiliar y bloque de viviendas, ubicados en tres climatologías diferentes: Burgos, Madrid y Sevilla, seleccionadas con objeto de considerar las condiciones ambientales exteriores más significativas que se pueden dar en el territorio nacional.

La climatología de Burgos es representativa de zonas climáticas en donde la demanda de calefacción es alta y la demanda de refrigeración es nula o muy baja, Madrid representa las zonas climáticas donde tanto la demanda de calefacción como la de refrigeración son relevantes adoptando valores intermedios, mientras que Sevilla representa las zonas donde la demanda de refrigeración es alta y la demanda de calefacción es baja.

Quedan por tanto, fuera de consideración aquellas zonas climáticas con climatologías más benignas, donde la aplicación de algunos de los criterios de ecoeficiencia propuestos en este capítulo es menos crítica. Por ejemplo, el impacto que supone no aislar un edificio ubicado en el archipiélago canario no es tan crítico como el impacto que se produciría en otras climatologías más extremas.

A partir de la evaluación de las medidas anteriores en los modelos considerados, se hará una extrapolación de dichos resultados al conjunto del sector de la edificación residencial en España, obteniendo una aproximación al potencial de disminución de los impactos energéticos y medioambientales a través de las curvas ahorro-inversión (Valero A., 1982) del sector.

Entre las medidas de ecoeficiencia a evaluar cabe destacar la adecuada orientación y ubicación del edificio, las ratios recomendadas para la ventilación e infiltraciones del edificio, los sistemas energéticos activos más adecuados, el ecodiseño de la envolvente térmica del edificio, la disminución de las necesidades de transporte de los materiales de construcción y la disminución de la movilidad de los usuarios.

Puesto que el edificio constituye un todo orgánico, las medidas anteriores afectarán directamente a algunos elementos u órganos del edificio en un instante de tiempo determinado, que a su vez podrán repercutir en ese mismo instante o posteriormente sobre otros elementos del edificio, así como sobre el conjunto del edificio y su entorno inmediato. Por todo ello, la valoración del impacto de las medidas sobre los edificios se realiza por medio de una metodología global como el ACV.

### 5.1. Definición de los modelos de edificación residencial

Según la metodología general establecida en el procedimiento nacional de certificación energética de viviendas se considera que todos los edificios residenciales se pueden clasificar en dos tipologías constructivas: viviendas unifamiliares y viviendas en bloque. Por ello, los modelos a estudiar se corresponden únicamente con estas dos tipologías.

Para garantizar su representatividad, la definición de las principales características de los modelos a analizar se ha basado en la superficie útil -para las viviendas unifamiliares- y en el número de plantas -para los bloques de viviendas, a partir de las estadísticas del sector nacional incluidas en el capítulo 1 que afirman que la superficie de las viviendas unifamiliares de de 76-90 m<sup>2</sup> y que el número habitual de plantas en los bloques de viviendas es de 4, existiendo en ambos casos una clara tendencia al alza.

En cuanto a la ubicación de los modelos, tal como se ha comentado anteriormente, se han seleccionado las climatologías de Burgos, Madrid y Sevilla. Conviene recordar que, según la sección HE1 del Documento Básico de Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación (CTE-DB-HE1), España se divide en varias zonas climáticas, que se establecen en función de las denominadas severidades climáticas. La severidad climática es una variable meteorológica que combina la influencia conjunta de la temperatura exterior y de la radiación solar en los meses de invierno y en los meses de verano. Tal como muestra la Figura 5.1, cada zona climática se identifica mediante una letra (de la A a la E, en orden creciente según la severidad climática de invierno) seguida de un número (del 1 al 4, en orden creciente según la severidad climática de verano).

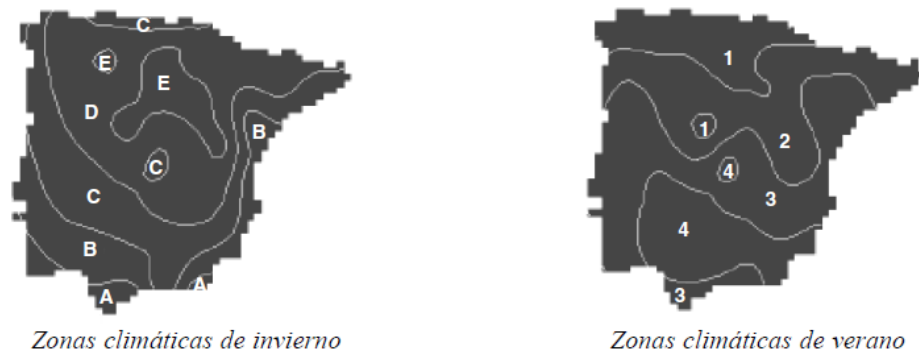


Figura 5.1. Zonas climáticas de invierno y verano según CTE-DB-HE1

La siguiente figura muestra las 12 zonas climáticas en las que se ubican todas las localidades españolas, remarcando las zonas consideradas en el estudio.



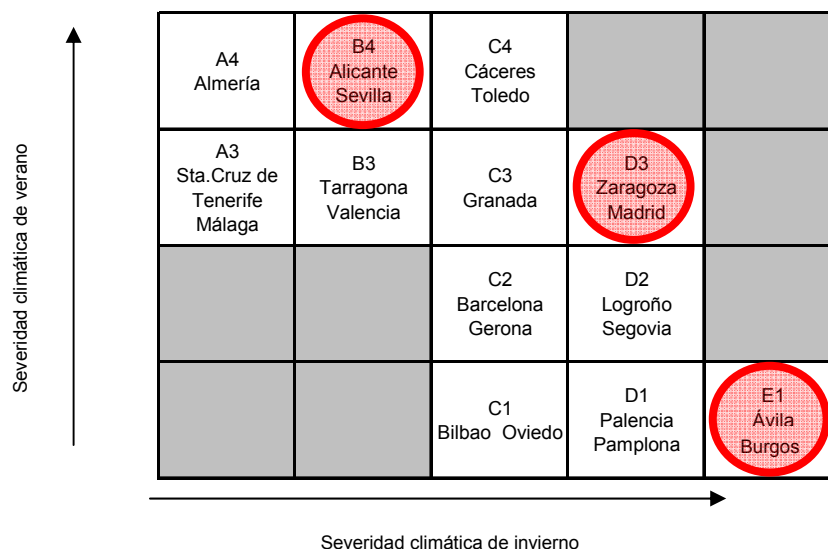


Figura 5.2. Zonas climáticas según CTE-DB-HE1 y zonas seleccionadas

Seguidamente se describen las principales especificaciones de cada uno de los modelos considerados.

### 5.1.1. Modelo de vivienda unifamiliar

El modelo de vivienda unifamiliar es un edificio adosado de 222 m<sup>2</sup> con un volumen total de 459 m<sup>3</sup>. Se supone que para cada climatología analizada, la vivienda cumple estrictamente con los requisitos relativos a la limitación de la demanda energética establecidos en España en el CTE-DB-HE1. Para ello, en cada climatología se ha ajustado la transmisividad de los distintos cerramientos, dotando a la vivienda del espesor de aislamiento térmico mínimo necesario para cumplir con dichos requisitos.

Tal como muestra la Figura 5.3, el edificio analizado está formado por 4 plantas: un sótano (P01), la planta baja (P02), la planta primera (P03) y una buhardilla (P04).

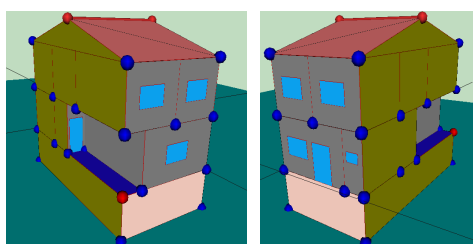


Figura 5.3. Distintas perspectivas del modelo de vivienda unifamiliar

Los sistemas de climatización actúan únicamente sobre la planta baja y la planta primera, cuya zonificación se muestra en la Figura 5.4, por lo que la superficie climatizada de la vivienda asciende a 107,6 m<sup>2</sup>.

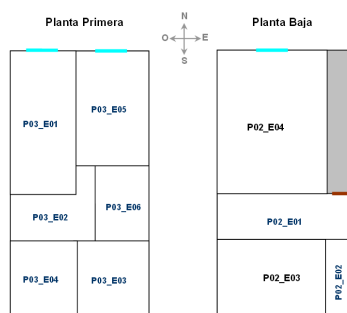


Figura 5.4. Zonificación de las plantas baja y primera de la vivienda unifamiliar

La Tabla 5.1 muestra la descripción de cada uno de los espacios en los que se divide el edificio, así como sus principales características geométricas.

Planta	Espacio	Descripción	Tipo	Uso	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )
P01	P01_E01	Sótano - Parking	No Habitable	Estanqueidad 3	56,92	2,4	136,61
P02	P02_E01	Pasillo - Escalera	Habitable	Residencial	9,68	3	29,05
	P02_E02	Aseo	Habitable	Residencial	3,38	3	10,13
	P02_E03	Cocina	Habitable	Residencial	13,19	3	39,58
	P02_E04	Salón	Habitable	Residencial	24,44	3	73,31
P03	P03_E01	Dormitorio 1	Habitable	Residencial	14,55	3	43,64
	P03_E02	Pasillo - Escalera	Habitable	Residencial	7,45	3	22,34
	P03_E03	Dormitorio 2	Habitable	Residencial	8,68	3	26,03
	P03_E04	Dormitorio 3	Habitable	Residencial	7,89	3	23,68
	P03_E05	Dormitorio 4	Habitable	Residencial	12,54	3	37,62
	P03_E06	Baño	Habitable	Residencial	5,82	3	17,46
P04	P04_E01	Buhardilla	No Habitable	Estanqueidad 2	56,92	0,75	42,69

Tabla 5.1. Definición geométrica de los espacios de la vivienda unifamiliar

Por otra parte, la Tabla 5.2 recoge el análisis de inventario con la composición capa a capa de los distintos cerramientos, particiones interiores, huecos y estructura del modelo de vivienda unifamiliar analizado para la climatología de Madrid. Como ya se ha comentado, se ha adaptado el espesor de aislamiento térmico de la envolvente térmica de la vivienda para cumplir con los requisitos mínimos establecidos por la normativa. En el caso de Sevilla esto supone mantener aproximadamente el mismo aislamiento que en Madrid, mientras que en el caso de Burgos supone un aumento del espesor de aislante de 3 cm en muros exteriores y de 6 cm en cubiertas; lo que modificaría ligeramente su inventario de ciclo de vida con respecto a las otras dos climatologías con un incremento del peso inferior al 0,1%.

Cerramiento	U (W/m <sup>2</sup> K)	Superficie (m <sup>2</sup> )	Material	Peso (t)
Muros exteriores	0,78	65,4	1/2 pie de ladrillo macizo métrico o catalán (40 mm < G < 50 mm)	16,32
			Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco o enlucido (1.000 < d < 1.250)	0,74
			EPS Poliestireno Expandido 3 cm (0,037 W/mK)	0,06
			Tabicón de ladrillo hueco doble (60 mm < E < 90 mm)	4,26
			Enlucido de yeso (1.000 < d < 1.300)	0,75
Medianeras	0,98	142,4	1/2 pie de ladrillo macizo métrico o catalán (40 mm < G < 50 mm)	35,54
			Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco o enlucido (1.000 < d < 1.250)	1,60
			EPS Poliestireno Expandido 2 cm (0,037 W/mK)	0,09
			Tabicón de ladrillo hueco doble (60 mm < E < 90 mm)	9,27
			Enlucido de yeso (1.000 < d < 1.300)	1,64
Tabiques	2,45	103,2	Enlucido de yeso (1.000 < d < 1.300)	1,19
			Tabicón de ladrillo hueco doble (60 mm < E < 90 mm)	7,68
			Enlucido de yeso (1.000 < d < 1.300)	2,37
Forjados interiores	0,82	108,8	Plaqueta o baldosa de gres	2,72
			Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco o enlucido (1.000 < d < 1.250)	2,45
			EPS Poliestireno Expandido 3 cm (0,037 W/mK)	0,10
			Forjado unidireccional entrevigado de hormigón (Canto 250 mm)	36,16
			Enlucido de yeso (1.000 < d < 1.300)	1,25
Forjados exteriores	0,37	6,2	Plaqueta o baldosa de gres	0,16
			Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco o enlucido (1.000 < d < 1.250)	0,14
			EPS Poliestireno Expandido 4 cm (0,037 W/mK)	0,01
			Forjado unidireccional entrevigado de hormigón (Canto 250 mm)	1,10
Forjados en contacto con el terreno	0,95	57,5	Azulejo cerámico	3,97
			Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco o enlucido (1.000 < d < 1.250)	0,65
			Arena y grava (1.700 < d < 2.200)	12,50
			Hormigón en masa (2.000 < d < 2.300)	18,54
			Tierra vegetal (d < 2.050)	40,24
Cubiertas	0,6	63,9	Teja cerámica-porcelana	2,94
			Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco o enlucido (1.000 < d < 1.250)	0,72
			Tabicón de ladrillo hueco doble (60 mm < E < 90 mm)	4,16
			EPS Poliestireno Expandido 4 cm (0,037 W/mK)	0,08
			Forjado unidireccional entrevigado de hormigón (Canto 250 mm)	21,24
			Enlucido de yeso (1.000 < d < 1.300)	1,47
Ventanas	3,3	10,9	Vidrio doble, con acabado de luna incolora de 4 mm de espesor cada una, cámara de aire de 6 mm y factor solar de 0,75	0,20
Marco de ventanas	2,2	1,1	Marco de aluminio lacado de dos hojas batientes, premarco de tubo de acero galvanizado	0,05
Puertas	3,2	14,2	Puerta interior de madera de sapeli barnizada	0,55
<b>Estructura</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>		<b>Material</b>	<b>Peso (t)</b>
Pilares de viviendas	3,24		Hormigón armado HA-25, 106 kg/m <sup>3</sup> de acero	7,47
Pilares de sótano-aparcamiento	1,62		Hormigón armado HA-25, 106 kg/m <sup>3</sup> de acero	3,74
Muros de contención	19,20		Hormigón armado HA-25, 150 kg/m <sup>3</sup> de acero	44,28
TOTAL:				288,38

Tabla 5.2. Inventario del ciclo de vida del modelo de vivienda unifamiliar en Madrid y Sevilla

En cuanto a los sistemas energéticos activos, la vivienda consta de un sistema mixto de calefacción y ACS constituido por una caldera convencional de gas natural de 28 kW con un rendimiento nominal del 92%, si bien el rendimiento total del sistema (en torno al 80%) es inferior, debido a las pérdidas en la distribución. La caldera suministra agua caliente a 80°C a diez radiadores con distintas potencias térmicas, distribuidos en las dos plantas del edificio. Además, para el ACS, la caldera recibe agua precalentada de una instalación solar térmica que garantiza un aporte solar medio anual variable en función de la ubicación (30% en Burgos, 60% en Madrid y 70% en Sevilla) sobre la demanda de ACS, que se estima en 90 l/día (30 l/persona día x 3 personas) para todos los casos. Finalmente, en el salón hay un split de aire acondicionado con una potencia total de refrigeración de 3,5 kW, una potencia sensible de refrigeración de 2,65 kW, un rendimiento (EER) de 2,5; y un caudal de impulsión de aire de 800 m<sup>3</sup>/h.

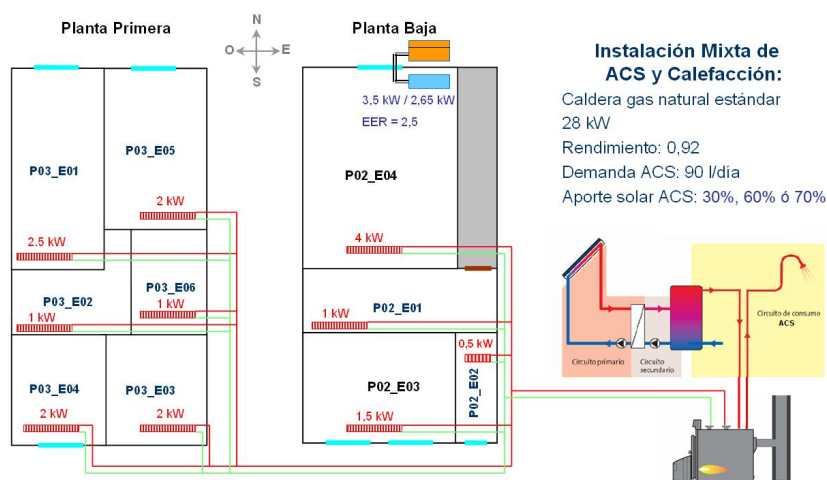


Figura 5.5. Sistemas de agua caliente sanitaria, calefacción y refrigeración en la vivienda

### 5.1.2. Modelo de bloque de viviendas

El modelo de bloque de viviendas es un edificio de 4.238 m<sup>2</sup> con un volumen total de 13.328 m<sup>3</sup>, que alberga un total de 40 viviendas con una superficie útil aproximada por vivienda de 75 m<sup>2</sup>. Al igual que en el unifamiliar, en este modelo se ha ajustado la transmisividad de los cerramientos con el espesor de aislamiento térmico mínimo necesario para cumplir con los requisitos normativos en cada climatología.

El bloque de viviendas está constituido por 1 planta subterránea (P01) utilizada como aparcamiento y 5 plantas en superficie (P02-P06), tal como se observa en la Figura 5.6.

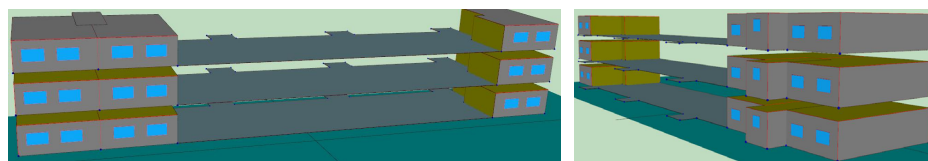


Figura 5.6. Distintas perspectivas del modelo de bloque de viviendas

El sistema de calefacción actúa sobre todo el edificio, a excepción del ascensor, las escaleras y la planta de aparcamiento subterráneo, por lo que la superficie

calefactada del bloque es de 3.000 m<sup>2</sup>. La Figura 5.7 presenta la zonificación elegida para realizar la simulación energética del edificio y la Figura 5.8 presenta la distribución de una de las viviendas del edificio.

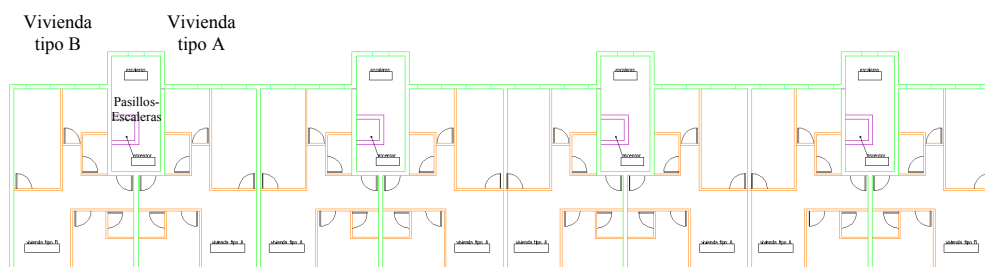


Figura 5.7. Zonificación de las plantas 1-5 del bloque de viviendas

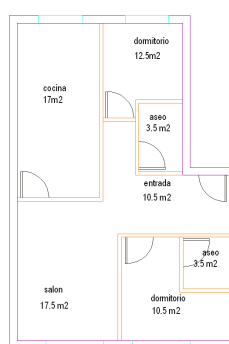


Figura 5.8. Distribución de una vivienda del edificio

En la Tabla 5.3 se describen las principales características geométricas de los espacios en los que se divide el edificio. Como se puede observar, existen 8 viviendas por planta, a las que se accede desde un total de 4 ascensores. Dentro de cada planta, hay dos tipologías de vivienda: las 2 viviendas tipo B se corresponden con los extremos del bloque y, por tanto, están más expuestas a las condiciones exteriores; mientras que las 6 restantes viviendas tipo A están más resguardadas. Cada vivienda dispone de un vestíbulo que da acceso a dos dormitorios, un salón, una cocina, un baño y un aseo.

Planta	Espacio	Descripción	Tipo	Uso	Área (m <sup>2</sup> )	Altura (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )
P01 (sótano)	E01	Parking subterráneo	No Habitable	Estanqueidad 3	818	3,75	3.067,5
P02 – P06 (1ª-5ª)	E01 x 6 x 5	Vivienda A x 6 x 5	Habitable	Residencial	75 x 6 x 5	3	225 x 6 x 5
	E02 x 4 x 5	Ascensor + Escaleras x 4 x 5	Habitable	Residencial	21 x 4 x 5	3	63 x 4 x 5
	E03 x 2 x 5	Vivienda B x 2 x 5	Habitable	Residencial	75 x 2 x 5	3	225 x 2 x 5

Tabla 5.3. Definición geométrica de los espacios del bloque de viviendas

El inventario con la composición capa a capa de los distintos cerramientos, particiones interiores, huecos y estructura del bloque de viviendas analizado para la climatología de Madrid se presenta en la Tabla 5.4. Puesto que el espesor de aislamiento de la envolvente térmica se ha adaptado a los requisitos mínimos normativos, en los casos de Sevilla y Burgos el inventario varía ligeramente. Así,

en Sevilla se disminuye en 1 cm el espesor de aislante en muros exteriores y cubiertas; mientras que en Burgos se aumenta en 1 cm el espesor de aislante en cubiertas.

Cerramiento	U (W/m <sup>2</sup> K)	Superficie (m <sup>2</sup> )	Material	Peso (t)
Muros exteriores	0,59	3.702	1/2 pie de ladrillo perforado métrico o catalán (80 mm < G < 100 mm)	416,48
			Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco o enlucido (1.000 < d < 1.250)	83,30
			EPS Poliestireno Expandido. 2 cm (0,029 W/mK)	2,22
			Tabicón de ladrillo hueco doble (60 mm < E < 90 mm)	258,21
			Enlucido de yeso (1.000 < d < 1.300)	85,15
Tabiques	2,42	3.240	Enlucido de yeso (1.000 < d < 1.300)	74,52
			Tabicón de ladrillo hueco doble (60 mm < E < 90 mm)	225,99
			Enlucido de yeso (1.000 < d < 1.300)	74,52
Forjados interiores	0,62	3.625	Froncosa ligera (435 < d < 565)	36,25
			Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco o enlucido (1.000 < d < 1.250)	203,91
			Forjado unidireccional entrevigado de EPS mecanizado enrasado (Canto 300 mm)	815,63
			Enlucido de yeso (1.000 < d < 1.300)	83,38
Forjados en contacto con el terreno	0,61	825	Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco o enlucido (1.000 < d < 1.250)	46,4
			XPS Expandido con dióxido de carbono CO <sub>2</sub> . 4 cm (0,038 W/mK)	1,2
			Forjado unidireccional entrevigado de hormigón (Canto 300 mm)	306,9
Cubiertas	0,49	725	Grava rodada	61,63
			XPS Expandido con dióxido de carbono CO <sub>2</sub> . 5 cm (0,034 W/mK)	1,36
			Betún fieltro o lámina	3,99
			Mortero de cemento o cal para albañilería y para revoco o enlucido (1.250 < d < 1.450)	48,94
			Forjado unidireccional entrevigado de hormigón (Canto 300 mm)	269,70
			Enlucido de yeso (1.000 < d < 1.300)	16,68
Ventanas	2,8	297	Vidrio doble 4-12-6, con acabado de luna incolora de 4 y 6 mm de espesor y cámara de aire de 12 mm, y factor solar de 0,65	5,96
Marco de ventanas	2,2	33	Marco de madera de iroko barnizado de 2 hojas batientes, premarco de madera	2,65
Puertas	3,2	475	Puerta interior de madera de sapeli barnizada	13,11
<b>Estructura</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>		<b>Material</b>	<b>Peso (t)</b>
Pilares de viviendas	62,88		Hormigón armado HA-25, 106 kg/m <sup>3</sup> de acero	145,00
Pilares de sótano-aparcamiento	14,19		Hormigón armado HA-25, 106 kg/m <sup>3</sup> de acero	32,72
Muros de contención	115,02		Hormigón armado HA-25, 150 kg/m <sup>3</sup> de acero	265,23
TOTAL:				3.581,04

Tabla 5.4. Inventario del ciclo de vida del modelo de bloque de viviendas en Madrid

En cuanto a los sistemas energéticos activos, el bloque de viviendas consta de un sistema centralizado de calefacción y ACS constituido por dos calderas

convencionales de gas natural con un rendimiento nominal del 90%. La caldera para calefacción, que tiene una potencia de 300 kW, suministra agua caliente a 80°C a los radiadores de las viviendas. La potencia térmica total de los radiadores en cada vivienda es de 7,5 kW. Por su parte, la caldera para ACS, que tiene una potencia de 50 kW, recibe agua precalentada de una instalación solar térmica que garantiza un porcentaje de aporte solar medio anual similar al considerado en la vivienda unifamiliar, sobre una demanda de ACS estimada para todos los casos en 2.640 l/día (40 viviendas x 3 personas/vivienda x 22 l/persona día). En cuanto a la refrigeración, el bloque no incorpora inicialmente ningún tipo de sistema de refrigeración, aunque los resultados de la simulación energética indican que existe una demanda de refrigeración. Por ello se supondrá que dicha demanda es cubierta mediante la instalación de splits de aire acondicionado en algunas de las viviendas.

## **5.2.Evaluación de medidas para la disminución del impacto energético y medioambiental en los modelos considerados**

Seguidamente se presentan y evalúan un conjunto de medidas aplicables a la edificación residencial con objeto de disminuir sus impactos energéticos y ambientales. Dicha evaluación se hace en base a la energía final, la energía primaria y las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> teniendo en cuenta los factores de paso expuestos en el capítulo 2, a fin de considerar en todos los casos el ciclo de vida completo.

Respecto a la metodología general presentada en el capítulo 4, en los siguientes análisis se han adoptado las siguientes simplificaciones:

- Etapa de producción: Se incluye la fabricación de la estructura y cerramientos del edificio, de los sistemas energéticos de climatización y de los sistemas renovables.
- Etapa de construcción: Se incluye el transporte entre la planta y el edificio de los materiales de construcción.
- Etapa de uso: Se incluye el consumo de energía final (calefacción, refrigeración, ACS e iluminación) necesario para la operación del edificio.
- Etapa de fin de vida: Se incluye el fin de vida de la estructura y los cerramientos del edificio.
- Evaluación de impactos: Se consideran la energía incorporada y el potencial de calentamiento global.

### **5.2.1.Orientación correcta de la fachada principal del edificio**

La orientación de un edificio viene dada por la dirección de su fachada principal con respecto al eje norte-sur. Los principales factores que condicionan la correcta orientación de un edificio son el máximo aprovechamiento de la radiación solar en invierno, evitando los sobrecalentamientos que ésta produce durante el verano, el aprovechamiento de la luz natural, el resguardo frente a los vientos fríos en invierno o la exposición a estos en verano. No obstante el criterio de máximo aprovechamiento de la radiación para disminuir las necesidades de climatización suele ser el más habitual.

En las latitudes intermedias del hemisferio Norte, la orientación sur, con variaciones de hasta  $\pm 30^\circ\text{C}$ , suele ser la más recomendable. Esto es debido fundamentalmente a la trayectoria solar determinada por la altura solar y el acimut. Durante los meses de invierno, la altura solar es baja y la trayectoria es más reducida; mientras que en los meses de verano sucede lo contrario. Por ello, la energía solar incide sobre una fachada vertical orientada al sur con un ángulo mucho más próximo a la normal en el mediodía solar (momento de máxima radiación) durante los meses de invierno que durante los meses de verano; lo que hace que este tipo de fachadas reciba la máxima radiación en invierno, evitando la sobreexposición en verano (Turégano J.A., Velasco M.C., Martínez A., 2009). Todos los recursos de captación solar, tales como ventanas, captadores solares, invernaderos, muros trombé, etc.) deberían, por tanto, concentrarse en la orientación sur. El favorable comportamiento de las fachadas sur puede además mejorarse mediante la incorporación de aleros adecuadamente diseñados que bloqueen la insolación en verano, pero permitiéndola en invierno.

Por los mismos motivos expuestos anteriormente, la radiación solar sobre las fachadas este y oeste será mayor en verano que en invierno, y podrán producirse situaciones de sobrecalentamiento durante los meses de verano. Para evitar esta circunstancia se debería prever la integración de protecciones solares, como los partesoles, sobre estas fachadas, especialmente en la fachada oeste, ya que al recibir la radiación por la tarde coincide normalmente con las horas en las que la temperatura ambiente es mayor. Asimismo las cubiertas planas son otro punto donde pueden producirse sobrecalentamientos, por lo que, para evitar esta incidencia, deben estar correctamente aisladas.

Por su parte, las fachadas sudeste y suroeste reciben una insolación bastante homogénea a lo largo del año, mientras que las fachadas norte apenas recibe radiación directa, a excepción de algunos días en verano, lo que conlleva que sean frías en invierno y frescas en verano. Por ello en este tipo de fachadas deberá incrementarse el espesor de aislamiento y disminuir la superficie acristalada con objeto de disminuir las pérdidas energéticas.

La consideración de una adecuada orientación en el diseño del edificio conlleva importantes ahorros en los consumos de energía final que se producen a lo largo de toda la vida útil del edificio. En este apartado se ha valorado únicamente la influencia de la orientación sobre la calefacción y la refrigeración, despreciando el efecto sobre la iluminación, ya que, en este último caso, es más evidente que el factor usuario puede anular la mayor disponibilidad de luz natural.

Las siguientes gráficas presentan los consumos de energía final (calefacción, refrigeración y total agregando a los dos anteriores iluminación y ACS), expresados en kWh por  $\text{m}^2$  y año, que se obtienen para las 3 climatologías analizadas, considerando 6 posibles orientaciones de la fachada principal del edificio: norte, sur, este, oeste, sudeste y suroeste.



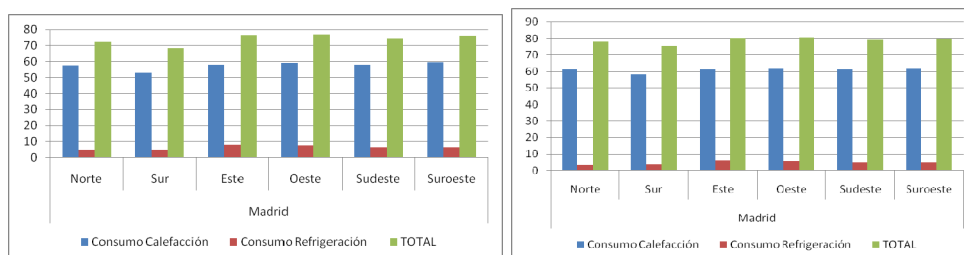


Figura 5.9. Consumos de energía final para distintas orientaciones de la fachada principal de la vivienda unifamiliar (izqda.) y del bloque de viviendas (dcha.) en Madrid

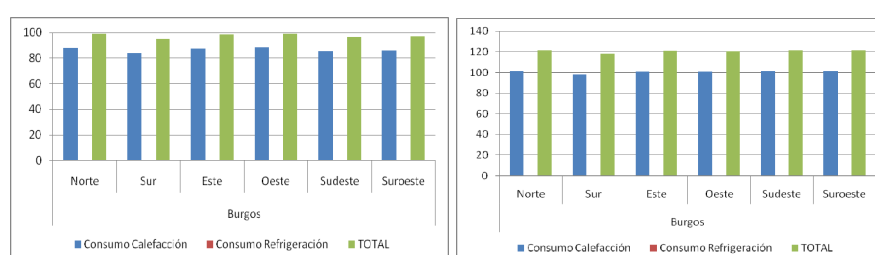


Figura 5.10. Consumos de energía final para distintas orientaciones de la fachada principal de la vivienda unifamiliar (izqda.) y del bloque de viviendas (dcha.) en Burgos

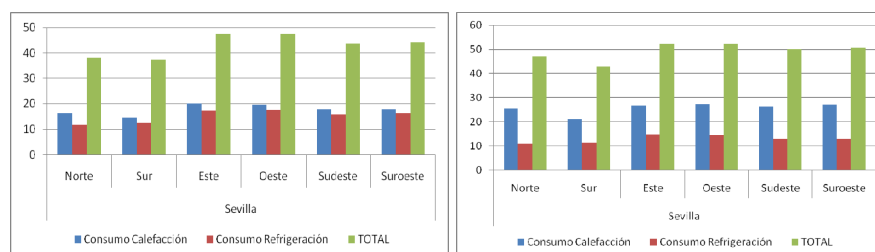


Figura 5.11. Consumos de energía final para distintas orientaciones de la fachada principal de la vivienda unifamiliar (izqda.) y del bloque de viviendas (dcha.) en Sevilla

La orientación sur es la que conlleva siempre los menores consumos de energía final. Sin embargo, la orientación norte no es siempre la peor, pudiéndose ser más desfavorables las orientaciones al este/oeste, dependiendo del diseño del edificio y de la climatología de la zona. Por ejemplo, en climatologías como la de Sevilla, la orientación al este/oeste es la peor, debido al fuerte sobrecalentamiento que se induce en los meses de verano, mientras que en climatologías como la de Burgos, la orientación norte es la más desfavorable.

Para viviendas unifamiliares, el potencial de ahorro máximo en energía final está en un rango de 4,2 a 10,1 kWh/m<sup>2</sup> y año, siendo mayor en Sevilla y menor en Burgos, ya que en el primer caso la orientación afecta tanto a la demanda de calefacción como a la de refrigeración, mientras que en el segundo caso, sólo afecta a la demanda de calefacción, puesto que no existe demanda de refrigeración.

Del mismo, para el bloque de viviendas, el ahorro máximo en energía final sería de 3,4 a 9,4 kWh/m<sup>2</sup> y año.

Al comparar entre sí los resultados obtenidos para la vivienda unifamiliar y el bloque de viviendas para una orientación determinada, se observa que el consumo anual de energía final por unidad de superficie es mayor en el caso del bloque. Si bien la idea habitualmente extendida y aceptada es que el consumo de los bloques de viviendas es menor que el de los unifamiliares, el resultado obtenido muestra que puede haber casos relativamente comunes en los que, a pesar de la mayor compacidad del bloque, suceda lo contrario, por lo que conviene remarcarlos y tenerlos presentes.

En el caso que nos ocupa, hay que tener muy en cuenta que el unifamiliar, al estar adosado, tiene 2 muros que, a todos los efectos, se consideran adiabáticos, a diferencia del bloque de viviendas donde todos los muros de la fachada son exteriores, lo que hace que las pérdidas a través de su envolvente sean mayores. Por ello, el incremento del consumo del bloque respecto al unifamiliar se produce sobre todo durante el invierno aumentando el consumo para calefacción.

Pero además, la tasa de ventilación de los dos modelos analizados no coincide, puesto que según la normativa vigente a la vivienda unifamiliar le correspondería una tasa de 0,7 renovaciones-hora, mientras que para el bloque de viviendas la tasa sería de 0,9 renovaciones-hora, lo que produce un incremento en los consumos del bloque con respecto al unifamiliar, especialmente para el servicio de calefacción.

Si se considerasen los mismos niveles de ventilación y de exposición exterior de las fachadas, los consumos del unifamiliar serían muy superiores a los del bloque, tal como se analiza más detalladamente en los siguientes apartados.

En cualquier caso, en base a los resultados obtenidos, es evidente que no se justifica el derribo de un edificio mal orientado antes del final de su vida útil con el único objeto de buscar una mejor orientación, por lo que esta medida sería de interés especialmente para nuevos edificios residenciales. Por ello, la inversión asociada para la aplicación de esta medida se puede considerar nula.

### **5.2.2. Elección adecuada de las tasas de ventilación**

El consumo para climatización de un edificio está fuertemente condicionado por sus infiltraciones y el nivel de ventilación requerido por el edificio, definido en término del “número de renovaciones-hora”. En edificios de viviendas, hay que calcular el valor que ha de utilizarse para todo el edificio, (es decir, el mismo para todos los espacios), según la metodología expuesta en la normativa vigente sobre calidad de aire interior: Documento Básico sobre Salubridad CTE-DB-HS3 del Código Técnico de la Edificación. Conviene destacar que esta normativa obliga a las viviendas a tener un sistema general de ventilación, híbrida o mecánica, haciendo que el aire circule desde los locales secos (comedores, dormitorios y salas de estar) donde habrá aberturas de admisión a los húmedos (aseos y cocinas) donde habrá aberturas de extracción.

A modo de ejemplo, la Tabla 5.5 muestra cómo hacer este cálculo, según normativa, para el modelo de vivienda unifamiliar analizado. En primer lugar, se calculan los caudales de impulsión de las zonas húmedas y de extracción de las zonas secas. A continuación, el caudal mayor de los dos se multiplica por el

volumen de aire interior de la vivienda, que se calcula a partir del volumen habitable de los espacios del edificio, restando el volumen de los forjados y cubiertas. Como se puede comprobar, para este modelo el número de renovaciones-hora requerido es de 0,7. Para el bloque de viviendas, el cálculo, efectuado de manera análoga, da un valor de 0,9.

Sin discutir la necesidad de mantener una adecuada calidad del aire dentro de la vivienda, la exigencia anterior requiere una reflexión, ya que, dependiendo de cómo se plantee, puede perjudicar en buena medida el comportamiento térmico del edificio.

	Caudal impulsión	Caudal extracción
Cocina de 13,19 m <sup>2</sup> (eléctrica y sin extractor)	2 l/s m <sup>2</sup> x 13,19 m <sup>2</sup> = 26,38 l/s	-
Baño	15 l/s	-
Baño	15 l/s	-
Dormitorio (1 persona)	-	5 l/s y pers. x 1 pers. = 5 l/s
Dormitorio (1 persona)	-	5 l/s y pers. x 1 pers. = 5 l/s
Dormitorio (2 personas)	-	5 l/s y pers. x 2 pers. = 10 l/s
Dormitorio (2 personas)	-	5 l/s y pers. x 2 pers. = 10 l/s
Salón (6 personas)	-	3 l/s y pers. x 6 pers. = 18 l/s
Caudal	56,38 l/s	48 l/s

Caudal máximo en l/s	56,38 l/s
Caudal máximo en m <sup>3</sup> /h	202,97 m <sup>3</sup> /h
Volumen de aire interior del edificio	288,42 m <sup>3</sup>
N.º renovaciones hora del edificio	0,7

Tabla 5.5. Cálculo del número de renovaciones hora requerido para el modelo de vivienda unifamiliar

Para evitar esto se debería exigir un control de la ventilación, de modo que se favoreciese ésta en los momentos en que la temperatura exterior sea inferior a la temperatura interior durante los meses de verano, y en los momentos del día con mayor temperatura exterior durante los meses de invierno, siempre y cuando la calidad del aire interior fuese baja (altos niveles de humedad y de CO<sub>2</sub>). Además de la temperatura exterior se debería considerar también el nivel de contaminación exterior (especialmente en edificios situados en el centro de la ciudad con gran flujo de vehículos) para evitar que en los momentos de mayor contaminación se ponga en marcha el sistema de ventilación.

En edificios donde la ventilación sea manual, hay que prestar especial atención al factor usuario, que con un comportamiento inadecuado puede disparar los consumos energéticos del edificio. En este sentido cabe citar la experiencia del Grupo de Energía y Edificación de la Universidad de Zaragoza en la monitorización de viviendas en Barrio Goya (Zaragoza). Los resultados obtenidos, mostrados en la Figura 5.12, permitieron concluir que algunas viviendas consumían hasta un 40% más de energía para calefacción que las viviendas similares contiguas, debido a un exceso de ventilación por parte de los usuarios. Por ello, la información al usuario sobre las pautas correctas de ventilación debería ser una prioridad, ya que el factor usuario puede contrarrestar o incluso llegar a anular los esfuerzos realizados en el ecodiseño de los edificios.

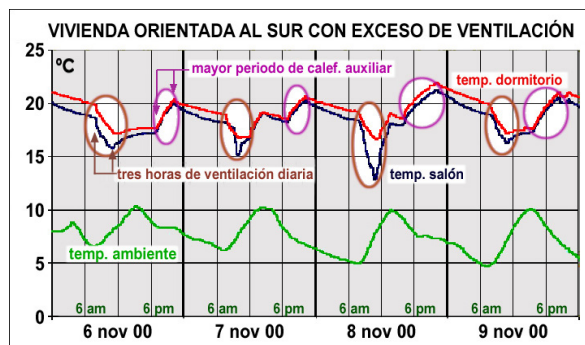


Figura 5.12. Monitorización del comportamiento térmico de las viviendas de Barrio Goya – Zaragoza. (Fuente: Turégano J.A., Velasco M.C., Martínez A., 2009)

Pero además del exceso de ventilación, un exceso de infiltraciones, causado por una mala estanqueidad de los cerramientos, especialmente de puertas y ventanas, podría producir un aumento indeseado del número de renovaciones-hora, y por tanto, del consumo de energía final del edificio.

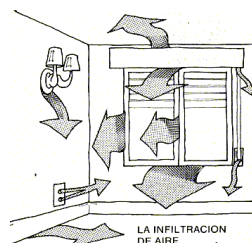


Figura 5.13. Infiltración de aire en una vivienda (Fuente: Fernández R., Carella A., 1981)

Por tanto, para conseguir una adecuada tasa de renovación, especialmente en edificios a rehabilitar, es preciso que los cerramientos sean de calidad, además de asegurar un buen control de los momentos en que ésta se debe producir. La inversión extra podría valorarse en 3.000€ para la vivienda unifamiliar y en 25.000€ para el bloque de viviendas.

A continuación se presentan los consumos de energía final para las 3 climatologías analizadas, considerando 4 posibles tasas de renovaciones-hora: 0,3, 0,5, 0,7, 1 y 1,5 renovaciones/hora. El valor habitual de esta tasa en viviendas se sitúa entre 0,5 y 1 renovación/hora.

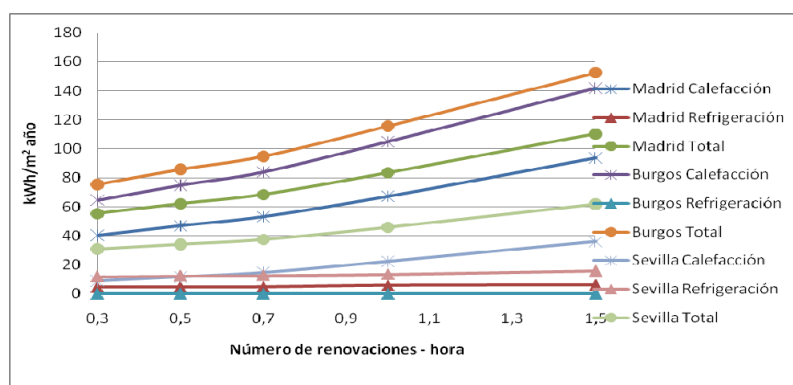


Figura 5.14. Consumos de energía final para distintas tasas de renovaciones-hora de la vivienda unifamiliar

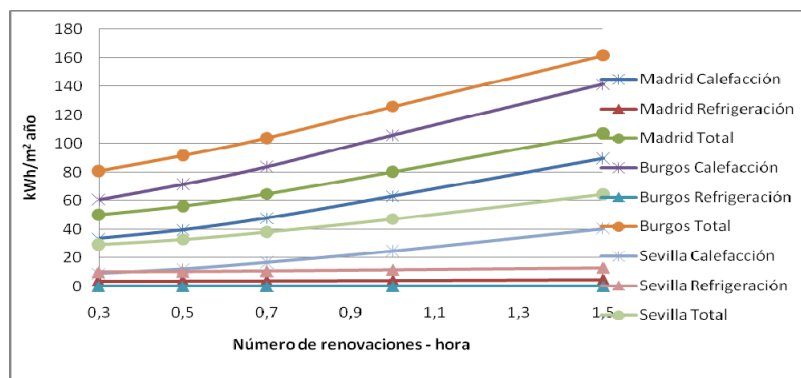


Figura 5.15. Consumos de energía final para distintas tasas de renovaciones-hora del bloque de viviendas

Como se puede comprobar, para las distintas ubicaciones de los modelos de edificios analizados, al multiplicar por cinco la tasa de renovaciones-hora, el consumo de energía final total se multiplica aproximadamente por dos.

El ahorro de energía final en la vivienda unifamiliar está en un rango de 8,5 a 20,9 kWh/m<sup>2</sup> y año, considerando la diferencia entre las tasas de 0,7 y 1 renovaciones-hora. Por otra parte, el ahorro obtenido en el bloque de viviendas es muy similar situándose en un rango de 9 a 22 kWh/m<sup>2</sup> y año, considerando, en este caso, la diferencia entre las tasas de 0,9 y 1,2 renovaciones-hora.

En los dos modelos analizados, el ahorro es mayor en climas como el de Burgos, y menor en climas como el de Sevilla, ya que el aumento de la tasa de renovación afecta más a la demanda de calefacción que a la de refrigeración. De hecho, tal como ya se ha comentado, si la renovación del aire en verano se produce durante la noche, el efecto que se produce no sólo no es perjudicial, sino que resulta beneficioso, al disminuir la demanda de refrigeración.

### 5.2.3. Selección correcta de los sistemas energéticos activos

La adecuada elección de los sistemas energéticos activos del edificio determina los consumos de energía final para climatización, obtenidos a partir del cociente entre la demanda de climatización del edificio y el rendimiento medio estacional de los sistemas activos correspondientes.

En este apartado, el análisis se centra en un sistema de calefacción multizona por agua con unidades terminales de agua caliente (radiadores) y con calderas independientes para agua caliente y calefacción (en el caso del bloque de viviendas) y caldera mixta (en el caso de la viviendas unifamiliar), al ser el sistema más habitual en la edificación residencial en España. Se ha evaluado la influencia del tipo de caldera (convencional y de condensación), del tipo de combustible (gas natural, gasóleo y biomasa) y de los sistemas de energías renovables integrables en el edificio (solar térmica y solar fotovoltaica).

A efectos de cálculo se ha considerado que el rendimiento energético es de 0,90 para las calderas de gas y gasóleo, de 0,95 para las calderas de condensación y de 0,75 para las calderas de biomasa. Además, dichos rendimientos se ven afectados por el factor de carga parcial al que se encuentre la caldera. A modo de ejemplo, la Figura 5.16 presenta las curvas del factor de corrección del rendimiento nominal

consideradas en la aplicación CALENER VYP para diferentes tipos de caldera en función del factor de carga parcial. Obviamente si la caldera está a plena carga, su factor de corrección será la unidad, obteniendo una mayor eficiencia energética.

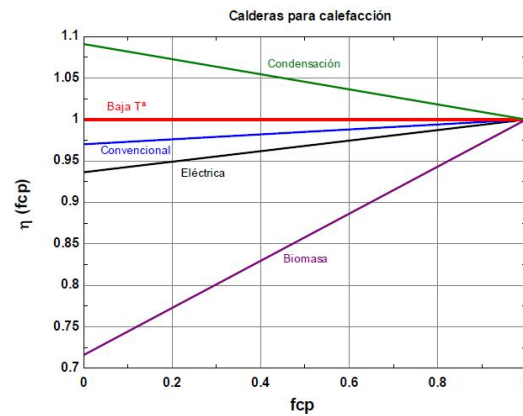


Figura 5.16. Factor de corrección del rendimiento de distintos tipos de caldera en función del factor de carga parcial

A modo de ejemplo, la siguiente figura presenta los consumos de energía final, la demanda de energía primaria y las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> para distintas combinaciones de los sistemas energéticos durante la etapa de uso del modelo de vivienda unifamiliar ubicado en Madrid. Para el bloque de viviendas, los resultados obtenidos son similares.

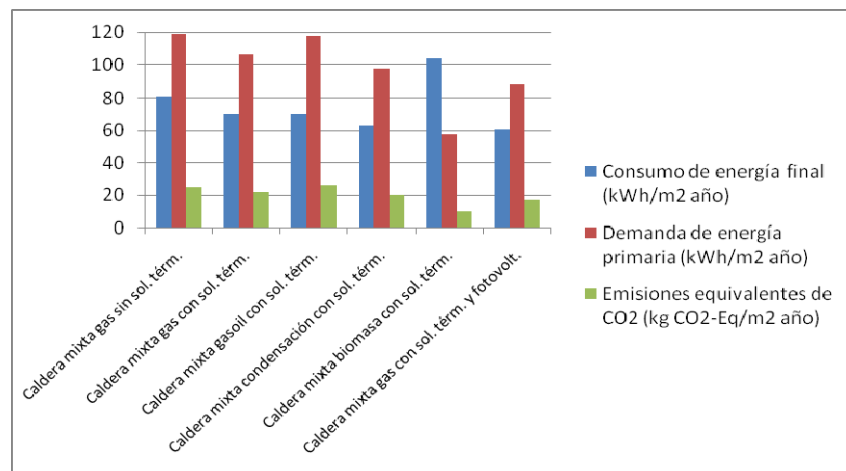


Figura 5.17. Consumos de energía final, energía primaria y emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> para distintas combinaciones de sistemas energéticos de la vivienda unifamiliar en Madrid

Analizando los resultados de la vivienda unifamiliar en la Figura 5.17, se observa que al sustituir el gas por gasóleo como combustible de la caldera convencional, el consumo de energía final no cambia, ya que se supone que las dos ofrecen un rendimiento similar. Sin embargo tanto la energía primaria como las emisiones aumentan un 10% y un 18% respectivamente. Por otra parte, si se sustituye la caldera convencional de gas por una caldera de condensación del mismo combustible se observa una disminución del 10% en el consumo de energía final, debido a la mayor eficiencia energética, disminuyendo también la energía primaria y las emisiones; mientras que si se sustituye la caldera convencional de gas por una

caldera de biomasa, se observa un aumento del 48% en el consumo de energía final de calefacción, como consecuencia de la menor eficiencia energética de este tipo de calderas, si bien se produce un fuerte descenso en las emisiones de CO<sub>2</sub> valorado en un 54%. Con respecto a los sistemas renovables, la instalación de un sistema solar térmico conlleva una disminución del 13% en el consumo de energía final, mientras que un sistema fotovoltaico conectado a red capaz de producir la energía correspondiente a los consumos de iluminación y refrigeración disminuye el consumo de energía final en un 14%.

Adicionalmente, y centrándose exclusivamente en el ACS, es interesante comparar el impacto que tendría un termoacumulador eléctrico frente al de una caldera mural de gas. Si bien en términos de energía final, los consumos pueden ser parecidos, al trasladarlos a energía primaria y emisiones considerando el ciclo de vida, los impactos del termoacumulador son más del doble de los correspondientes a la caldera. Así, para la vivienda unifamiliar de Madrid, sin considerar aporte solar térmico, la demanda de energía primaria para ACS es de 22,3 kWh/m<sup>2</sup> año si se usa una caldera, y de 57,9 kWh/m<sup>2</sup> año si se usa un termoacumulador; mientras que las emisiones derivadas del ACS son de 4,9 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> año para la caldera y de 10,1 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> año para el termoacumulador.

Por tanto, dentro de este apartado se proponen las 4 medidas siguientes, aplicables principalmente a edificios ya existentes:

- Sustitución de las calderas convencionales por calderas de condensación. En el caso de la vivienda unifamiliar, el coste añadido extra que supone se estima en unos 500€, con una disminución de 0,6 a 3,1 kg CO<sub>2</sub> equivalentes por m<sup>2</sup> y año. Para el bloque de viviendas la inversión extra sería de 3.000€, evitando la emisión de 0,9 a 3,9 kg CO<sub>2</sub> equivalentes por m<sup>2</sup> y año, lo que quiere decir que cada kg de CO<sub>2</sub> equivalente ahorrado vendría a costar entre 1 y 4,4 c€, valor claramente inferior a su precio en el mercado de emisiones.
- Sustitución de las calderas convencionales por calderas de biomasa. En este caso, el sobre coste (estimado en 3.800€ para la vivienda unifamiliar y en 30.000€ para el bloque de viviendas) es superior, si bien se obtiene una mayor disminución de las emisiones, pudiendo llegar a evitar hasta 19,3 kg CO<sub>2</sub> equivalentes por m<sup>2</sup> y año en la vivienda unifamiliar y hasta 24,4 kg CO<sub>2</sub> equivalentes por m<sup>2</sup> y año en el bloque de viviendas. De cualquier forma, la aplicabilidad de esta medida se encuentra limitada por la disponibilidad de biomasa en entornos locales, por lo que sólo se podría extrapolar a una parte del parque edificatorio.
- Instalación de captadores solares térmicos para cubrir un porcentaje determinado de la demanda de agua caliente sanitaria (ACS). Se ha considerado un sistema capaz de cubrir el 30% de la demanda de ACS en Burgos, el 60% de la demanda de ACS en Madrid y el 70% de la demanda de ACS en Sevilla, según los requisitos mínimos establecidos por la normativa vigente, basados en la disponibilidad de radiación solar. Para la vivienda unifamiliar, el coste del sistema se ha estimado en 3.000€ en las 3 ubicaciones, consiguiendo evitar la emisión de 1,5 a 3,2 kg CO<sub>2</sub> equivalentes por m<sup>2</sup> y año. En el caso del bloque de viviendas se estima un coste variable según la ubicación (entre 12.600€ y 27.600€), obteniendo una disminución en las emisiones ligeramente mayor, situándose en un rango de 1,7 a 3,6 kg CO<sub>2</sub> equivalentes por m<sup>2</sup> y año.

- Instalación en la cubierta de los edificios de paneles solares fotovoltaicos conectados a la red eléctrica para compensar los consumos finales de iluminación y refrigeración. Las emisiones evitadas en la vivienda unifamiliar se estiman en un rango de 2,5 a 8,9 kg CO<sub>2</sub> equivalentes por m<sup>2</sup> y año, con una inversión necesaria de 2.500€ a 6.800€. Por su parte, en el bloque de viviendas se evita la emisión de 2,4 a 8,1 kg CO<sub>2</sub> equivalentes por m<sup>2</sup> y año, con una inversión de 61.500€ a 164.500€. El ahorro y la inversión se sitúan en la parte alta del rango en las climatologías con mayores necesidades de refrigeración a compensar. No obstante, la disponibilidad de espacio suficiente para los paneles fotovoltaicos en cubierta o fachada (en este caso, con peor rendimiento) unido a la tendencia a la baja de las primas existentes para la energía fotovoltaica inyectada en la red, limitan, en cierto modo, una aplicabilidad generalizada de esta medida. Según la Asociación Europea de la Industria Fotovoltaica, la instalación de paneles fotovoltaicos en los tejados de los edificios permitiría cubrir hasta un 40% del consumo de electricidad de la Unión Europea en el año 2020.

Como medida adicional, aplicable únicamente en los bloques de viviendas, se propone la automatización, medición y facturación individualizada de las instalaciones de calefacción centralizadas. El problema de la asignación individualizada de los gastos de calefacción central a los diferentes usuarios de un bloque de viviendas constituye en muchos casos una fuente de problemas, lo que ha conducido, entre otras razones, a que se extiendan de forma generalizada los sistemas de producción térmica individuales. Tanto desde un punto de vista energético, como desde un punto de vista económico, no debería ser así, ya que generalmente los sistemas centralizados presentan un mejor rendimiento energético que las calderas de pequeña potencia, y tanto los costes de inversión como los de explotación se mejoran por los efectos de la economía de escala.

Por todo ello, se propone un control individualizado de la temperatura de la calefacción en cada una de las viviendas mediante termostato, para realizar una medición pormenorizada de los consumos de calefacción en cada vivienda, con objeto de emitir posteriormente las facturas correspondientes acordes con los consumos. No obstante, los gastos a pagar por cada usuario deberían incluir unos gastos fijos comunes y unos gastos variables -en función del consumo de cada usuario- considerando algunos factores de corrección para evitar situaciones en las que una vivienda se beneficie de las aportaciones de calor de las viviendas de alrededor, pagando una menor factura de calefacción.

Esta medida permitiría obtener un ahorro del 20% sobre el consumo de energía final de los equipos de calefacción (Zabalza I., Valero A., 2003), debido a la fuerte influencia que tiene sobre el factor usuario. En el bloque de viviendas analizado se necesitaría una inversión aproximada de 12.000€, correspondiente a la instalación de los contadores de energía térmica, consiguiendo evitar la emisión de 1,2 a 5,4 kg CO<sub>2</sub> equivalentes por m<sup>2</sup> y año, siendo mayor conforme mayor sea la severidad climática invernal. Evidentemente esta medida es aplicable en caso de que sea posible instalar un contador con termostato en cada vivienda que controle el consumo en todas sus dependencias.

Finalmente, con respecto a la refrigeración, conviene destacar que, salvo en climatologías calurosas como Sevilla, la demanda de refrigeración en los bloques de viviendas toma habitualmente valores bajos, a diferencia de los edificios



terciarios donde las elevadas cargas internas disparan dicha demanda y hacen que el consumo final para refrigeración sea el más importante del edificio.

Por todo ello, en España tradicionalmente dicha demanda no ha sido cubierta en los edificios residenciales, que hasta hace tan apenas 30 años no disponían de ningún tipo de sistema de refrigeración activo. Sin embargo, las mejoras tecnológicas que se han producido en los equipos de refrigeración, unidas al descenso en sus precios y al mayor nivel de renta disponible por la sociedad, ha ocasionado que en los últimos años esté proliferando la instalación masiva de equipos de aire acondicionado individuales en los bloques de viviendas. Este fenómeno, conocido como efecto rebote directo (Khazzoom, J. D., 1980), consiste en el aumento del consumo de los productos o servicios como consecuencia de su abaratamiento derivado de las mejoras en la eficiencia energética. Habitualmente el efecto rebote se expresa como el porcentaje de ahorro de energía que se espera se consiga de la mejora de la eficiencia energética aplicada. El efecto rebote afecta a todo el conjunto de productos y servicios de la economía de un país, pudiendo llegar a alcanzar cifras de hasta el 50%, especialmente si se trata de un país en desarrollo, donde la demanda de servicios no está saturada (Aranda A., 2009).

En lo que respecta a la refrigeración de los edificios, además del evidente impacto visual, las consecuencias de este fenómeno son un incremento de la situación de isla de calor en las zonas urbanas más densas, debido a la concentración del calor arrojado especialmente por los equipos situados en las plantas más próximas al suelo, y un aumento en los picos de demanda eléctrica durante los meses de verano, lo que obliga a disponer de unas infraestructuras cada vez más potentes, que si bien evitan una caída del sistema eléctrico en los momentos de pico; en otros numerosos momentos quedan infrutilizadas.

En climatologías como Madrid, el efecto rebote debido a la refrigeración en los bloques de viviendas, considerando su etapa de uso, se sitúa en cifras del 6% medido en energía final, y del 13% si se mide en energía primaria. Al considerar la energía primaria en el ciclo de vida completo del edificio, el efecto rebote se reduce al 9%.

#### **5.2.4. Sustitución del enfriamiento convencional por enfriamiento evaporativo**

La refrigeración en climas cálidos relativamente secos, se puede conseguir mediante un enfriamiento evaporativo.

En la Figura 5.18 se muestra el fundamento del enfriamiento evaporativo, estableciendo un volumen de control. Debido al proceso continuo de recirculación del agua, se considera que el agua entra al volumen de control a temperatura constante ( $T_w$ ), que estará próxima a la temperatura de salida del aire fresco. Debido a la baja humedad del aire que entra en el estado 1 ( $\omega_1$ ) con un caudal másico de aire seco ( $\dot{m}_a$ ), cuando éste entra en contacto con la tela empapada, parte del agua inyectada se evapora. La energía para la evaporación es suministrada por la corriente de aire, que reduce su temperatura (cede calor sensible) y sale en el estado 2 con una temperatura inferior ( $T_2$ ) a la de su entrada ( $T_1$ ). Como el aire entrante es relativamente seco, la mayor humedad que transporta la corriente de aire saliente ( $\omega_2$ ) suele mejorar el confort térmico.

De lo anterior se deduce que en climas donde la humedad relativa en verano es ya elevada (más del 80%), como por ejemplo, en zonas próximas a la costa, este proceso produciría un efecto de enfriamiento mínimo, por lo que no sería recomendable. Por tanto, a mayor nivel de humedad exterior, menor rendimiento del proceso. Por otra parte, conforme la temperatura de bulbo seco exterior es más alta, los enfriadores evaporativos proporcionan una mayor capacidad de enfriamiento, a diferencia de los equipos enfriadores convencionales por compresión de vapor.

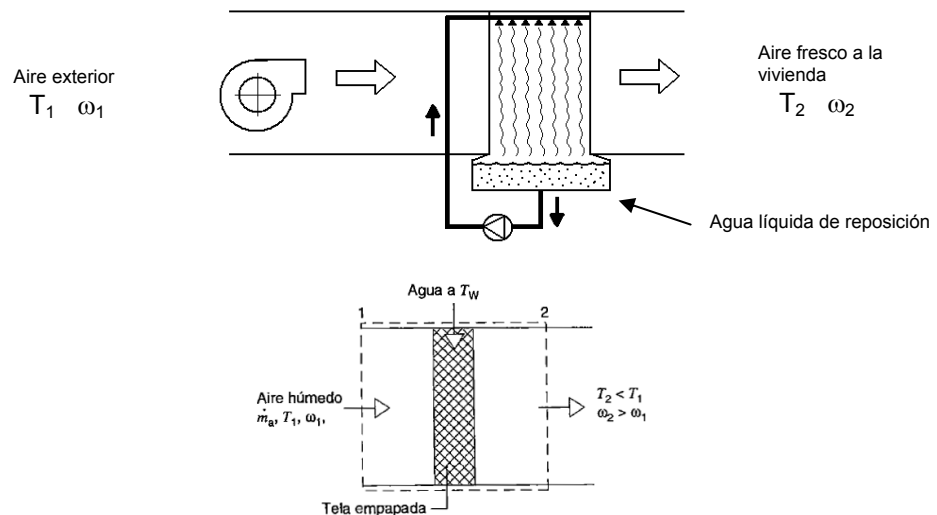


Figura 5.18. Proceso del enfriamiento evaporativo

A partir del análisis de los datos de diversos fabricantes y de diversas mediciones realizadas con prototipos experimentales del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza, se puede concluir que para una temperatura de entrada del aire de 30°C y una humedad relativa del 30-40%, el aire saldría a 21-22,5°C, mientras que si el aire entrase a 35°C con un 30% de humedad, se obtendría aire a la salida a una temperatura 25°C. Estas cifras confirman la idoneidad de este sistema de enfriamiento en climas cálidos y secos, siempre que se garantice una adecuada entrada de aire exterior al equipo, favoreciendo la ventilación cruzada, y evitando en cualquier caso su funcionamiento en modo de recirculación.

Al hacer circular una corriente de aire a través de un elemento humedecido, el aire experimenta a su paso un proceso similar al de saturación adiabática. Por ello, el enfriamiento evaporativo puede considerarse un proceso adiabático a entalpía constante, en el que disminuye el calor sensible, aumentando el calor latente, pero sin variar el calor total (suma del calor sensible y latente).

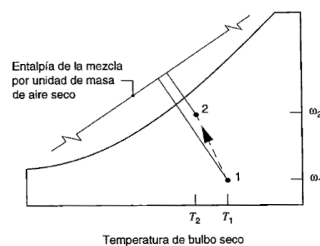


Figura 5.19. Representación sobre el diagrama psicrométrico del proceso de enfriamiento evaporativo.

El ahorro energético obtenido se debe a que el consumo energético del ventilador y bomba de agua del enfriador evaporativo es muy inferior al consumo energético del compresor de refrigerante de los equipos de aire acondicionado convencionales.

En la Figura 5.20 se comparan los consumos de energía final para refrigeración en Madrid y Sevilla, con el equipo de aire acondicionado convencional y con el enfriador evaporativo. Como se puede observar, este equipo conlleva una reducción aproximada del 70-75% en el consumo de energía final de refrigeración en ambas climatologías. Obviamente la medida no es aplicable a climatologías como Burgos, donde la demanda de refrigeración es nula.

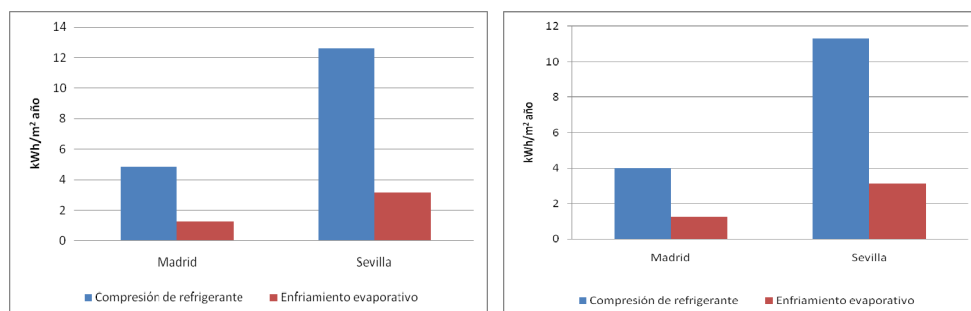


Figura 5.20. Consumos de energía final para refrigeración mediante compresión de refrigerante y enfriamiento evaporativo en la vivienda unifamiliar (izqda.) y en el bloque de viviendas (dcha.)

Para viviendas unifamiliares, el potencial de ahorro en energía final está en un rango de 3,57 a 9,48 kWh/m<sup>2</sup> y año con una inversión aproximada de 200€, mientras que para el caso de los bloques de viviendas, el ahorro es de 2,77 a 8,16 kWh/m<sup>2</sup> y año con una inversión aproximada de 6.000€.

### 5.2.5. Ecodiseño de la envolvente térmica del edificio

En este apartado se evalúa un conjunto de medidas cuyo objetivo común es conseguir diseñar una envolvente térmica ecoeficiente, que es una de las claves de la edificación sostenible.

#### 5.2.5.1. Adecuación del marco y vidrio de las ventanas

En los cerramientos de los edificios, los mayores intercambios de calor se producen a través de la superficie acristalada, ya que incluso las ventanas mejor aisladas presentan un coeficiente de transmisividad térmica superior al de los cerramientos opacos. Pero además de contribuir al calentamiento o el enfriamiento del edificio, las ventanas proporcionan luz y ventilación, condicionando el nivel de las infiltraciones en los edificios.

Por ello, la adecuada selección del tipo de vidrio y la correcta ubicación de los mismos, preferentemente en orientaciones sur, por su mejor comportamiento frente a la radiación solar, y evitando las direcciones del viento dominante para evitar un exceso de infiltraciones –que pueden llegar a suponer hasta el 50% de las necesidades de calefacción en los meses de invierno- (Turégano J.A., Velasco M.C., Martínez A., 2009), constituye una medida esencial para disminuir los impactos energéticos y ambientales en los edificios. Asimismo, los dispositivos de control solar, como las persianas, son fundamentales para conseguir una reducción en la demanda de energía final del edificio. Sin embargo, al depender su

comportamiento fuertemente del factor usuario, resulta difícil de hacer una evaluación suficientemente precisa de las mejoras asociadas al uso de estos dispositivos, por lo que no se han considerado dentro del análisis.

Un uso abusivo y un mal diseño de la superficie acristalada (ver Figura 5.21), tan común en muchos edificios terciarios, sin tener en cuenta los criterios anteriores produce un incremento en los consumos de los edificios.

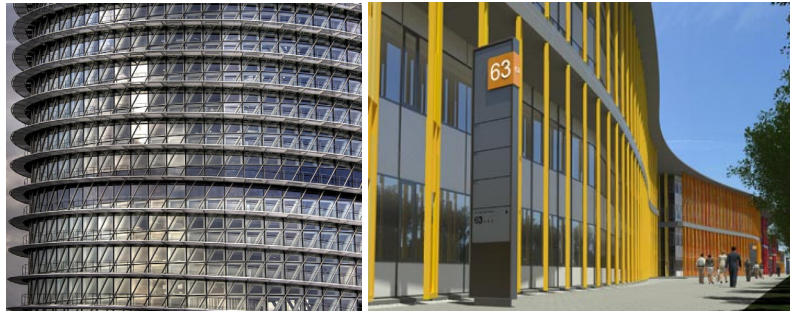


Figura 5.21. Superficie acristalada de la Torre del Agua (izqda.) en la “Expo Zaragoza 2008 - Agua y Desarrollo Sostenible” y futuro parque empresarial en el recinto de la Expo (dcha.).

La mejor orientación de la superficie acristalada será aquella que reciba la mayor radiación solar en invierno y la menor en verano. Como muestra la Figura 5.22, los vidrios ubicados en fachadas sur reciben en invierno cerca del triple de radiación solar que los de cualquier otra fachada, invirtiéndose la situación en verano donde se recibe mucha menos radiación que en las fachadas este, oeste y cubierta.

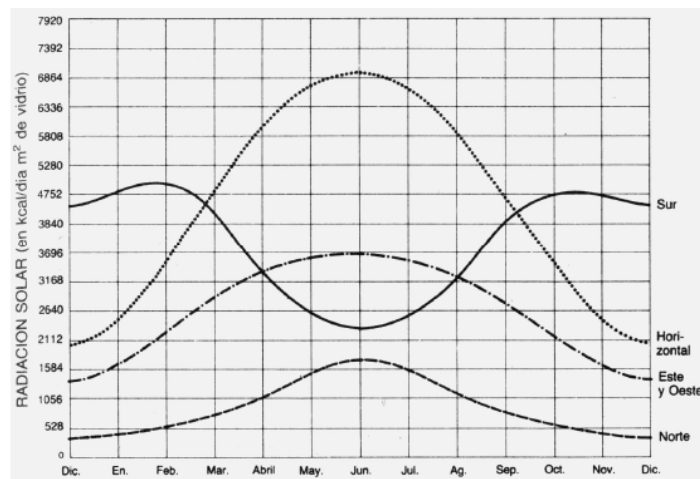


Figura 5.22. Radiación solar incidente para una latitud de 40°N para distintas orientaciones de los huecos de fachada y para cubierta horizontal (Fuente: Mazria E., 1979)

Actualmente existen diversos tipos de vidrio en el mercado, como por ejemplo, los vidrios de baja emisividad, que reducen la pérdida de calor del edificio a través de la ventana; los vidrios absorbentes de calor, capaces de absorber hasta el 45% de la radiación solar incidente reduciendo la ganancia solar del edificio; los vidrios reflectantes, que reducen la ganancia solar pero también la luz que entra en el edificio; y los innovadores vidrios cromogénicos capaces de modificar su

transparencia a la luz y conductividad térmica en función de las condiciones ambientales existentes.

En este apartado se analizan 3 tipos de vidrios: simple de 4 mm de espesor con una transmisividad de 5,7 W/m<sup>2</sup>K y un factor solar de 0,85; doble 4-16-4 con una transmisividad de 1,1 W/m<sup>2</sup>K y un factor solar de 0,7; y triple 4-12-4-12-4 con una transmisividad de 0,5 W/m<sup>2</sup>K y un factor solar de 0,65.

A la hora de evaluar el impacto de las ventanas, hay que considerar en primer lugar que el tipo de vidrio y carpintería utilizados condicionan la energía primaria incorporada y las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> asociadas a su fabricación, transporte y disposición final, tal como se muestra en las siguientes figuras.

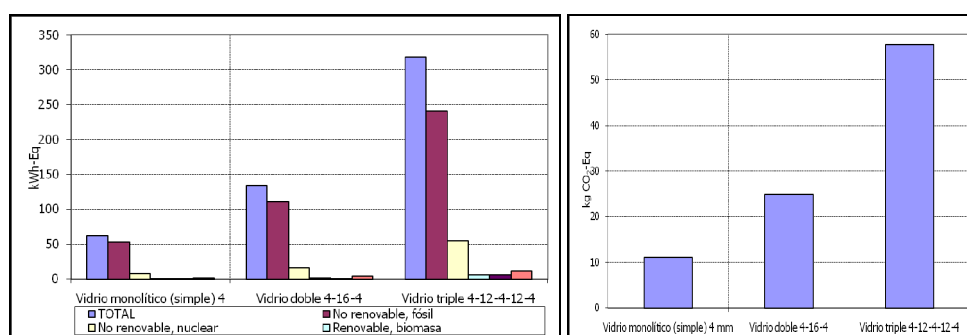


Figura 5.23. Energía primaria incorporada y emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> asociadas a la fabricación, transporte y disposición final de 1 m<sup>2</sup> de distintos tipos de vidrios

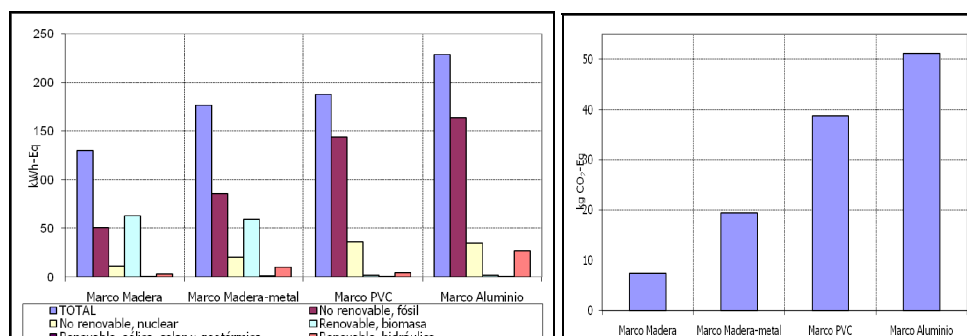


Figura 5.24. Energía primaria incorporada y emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> asociadas a la fabricación, transporte y disposición final de 1 m<sup>2</sup> de distintos tipos de marcos de ventanas

Obviamente los vidrios doble y triple considerados presentan un impacto superior al del vidrio simple. Sin embargo, este impacto se verá totalmente compensado, como se demostrará posteriormente, al inducir una menor demanda de energía en los edificios. Respecto al tipo de marco que conforma la carpintería de la ventana, cabe señalar el alto impacto del aluminio -material muy extendido en la edificación actual-, cuyas emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> son 7 veces mayores a las de los tradicionales marcos de madera.

Combinando los distintos tipos de vidrio y carpinterías, es posible analizar el impacto de distintos tipos de ventanas. Como se observa en la Figura 5.25, el impacto del marco es tan significativo o más que el del vidrio, ya que por ejemplo, las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> de una ventana de vidrio triple 4-12-4-12-4 con

marco de madera son del mismo orden de magnitud que las de una ventana de vidrio simple de 4 mm con marco de aluminio.

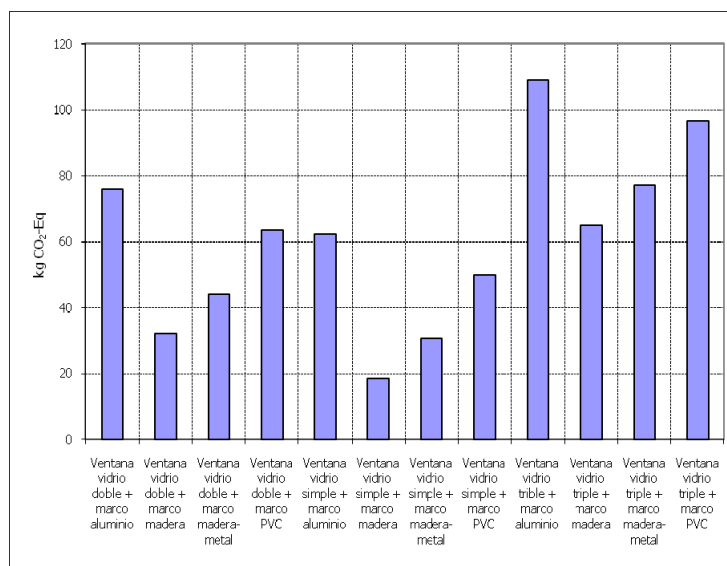


Figura 5.25. Emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> asociadas a la fabricación, transporte y disposición final de 1 m<sup>2</sup> de distintos tipos de ventanas

No obstante, el análisis no sería completo si no se considera la repercusión de la ventana sobre el consumo de energía final de los edificios. De la Figura 5.26 se deduce que el consumo de energía final en la vivienda unifamiliar de Madrid se reduce en un 21% al sustituir el vidrio simple por el vidrio doble, mientras que si se sustituye por vidrio triple la reducción alcanza casi el 25%. Esta reducción se debe a la disminución del consumo en calefacción, ya que el consumo en refrigeración, no sólo no disminuye sino que aumenta ligeramente, como consecuencia de la mayor dificultad para disipar el calor generado por las cargas internas del edificio (iluminación, equipos, electrodomésticos, usuarios, etc.). Los ahorros en la energía final dependen mucho de la ubicación, ya que con la sustitución del vidrio simple por el doble en la vivienda de Burgos se consigue un ahorro del 25%, mientras que en Sevilla, el ahorro se queda en un 16%; lo que demuestra que la sustitución del vidrio es más efectiva en climatologías con mayor severidad climática invernal. Por otra parte, hay que destacar que los ahorros anteriores se han obtenido para una vivienda con una superficie acristalada de 10,9 m<sup>2</sup> (aproximadamente el 3,2% de la envolvente) y que dichos ahorros serán mayores conforme mayor sea la superficie acristalada de la vivienda.

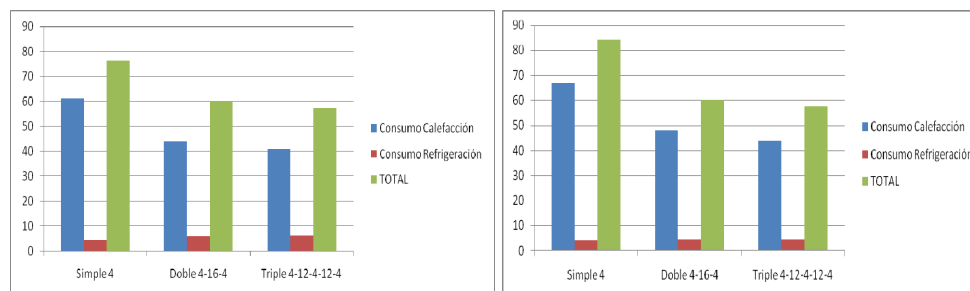


Figura 5.26. Consumo de energía final en kWh/m<sup>2</sup> y año con distintos vidrios y marco de madera para la vivienda unifamiliar (izqda.) y el bloque de viviendas (dcha.) en Madrid.

En cuanto al bloque de viviendas, cuya superficie acristalada es de 297 m<sup>2</sup> (aproximadamente el 5,5% de la envolvente) los resultados muestran unas tendencias similares, pero aumentando los ahorros obtenidos, debido al aumento del porcentaje de acristalamientos. Así, la sustitución del vidrio simple por el vidrio doble en Madrid, conlleva una reducción del consumo de energía final del 29%, es decir un 8% más que en el caso del unifamiliar.

En cuanto al tipo de marco, aunque también repercute en el consumo de energía final, las diferencias no son tan relevantes como las que se producen con los distintos tipos de vidrio, siendo preferible el marco de madera frente a otros tipos de marco debido a su menor transmisividad, y el marco de aluminio la peor opción, especialmente si no dispone de un sistema de rotura del puente térmico, sistema habitualmente constituido por varillas de poliamida reforzadas con fibra de vidrio.

Finalmente, agregando los impactos en la fabricación, transporte y disposición final de las ventanas con los impactos derivados de los consumos inducidos en la etapa de uso del edificio, se concluye que los importantes ahorros energéticos obtenidos en la etapa de uso hacen que el impacto en las etapas de fabricación, transporte y disposición final de las ventanas sean despreciables. A modo de ejemplo, en la vivienda unifamiliar ubicada en Madrid, al cambiar los 10,9 m<sup>2</sup> de ventanas de vidrio simple y aluminio por ventanas de vidrio doble y madera, suponiendo una vida útil de las ventanas de 25 años, el ahorro en energía primaria correspondiente a la etapa de uso del edificio es de 1.867 kWh/año, aumentando la energía primaria en las restantes etapas en tan solo 12 kWh/año, por lo que dichas etapas representan, por tanto, menos del 0,7% de la energía primaria total.

En base a todos los resultados anteriores, y teniendo en cuenta que la sustitución de ventanas es una de las actuaciones más sencillas que se pueden llevar a cabo sobre la fachada de un edificio, cabe proponer la sustitución de las ventanas de vidrio simple y marco de aluminio por ventanas de vidrio doble con marco de madera. Con ello, en la vivienda unifamiliar, se obtendría una disminución de las emisiones equivalentes de 1,9 a 7,7 kg CO<sub>2</sub>-Eq por m<sup>2</sup> y año, con un sobre coste adicional de 700€ aproximadamente; mientras que en el caso del bloque de viviendas, debido al mayor porcentaje de superficie acristalada, se conseguiría una disminución de 2,8 a 9,6 kg CO<sub>2</sub>-Eq por m<sup>2</sup> y año.

#### **5.2.5.2. Eliminación de parkings subterráneos en los edificios**

Una de las medidas más efectivas, especialmente en edificios de 2 ó 3 plantas, y posiblemente también más controvertida, es sin duda, el rediseño de dichos edificios suprimiendo la planta sótano, cuya finalidad principal es la de servir de estacionamiento subterráneo para vehículos privados.

Según un estudio de la *University of British Columbia* (Canadá), la inclusión de un parking subterráneo en edificios de oficinas incrementa la energía incorporada asociada a la estructura del edificio en un 21% si la estructura es de acero, en un 25% para estructuras de hormigón y en un 38% para estructuras de madera (Cole R.J., Kernan P.C., 1996).

La inclusión de plantas subterráneas de parking conlleva, por un lado, incentivar una movilidad basada en el uso del vehículo privado, y por el otro, supone un elevado consumo de materiales constructivos de alto impacto, ya que la construcción de este tipo de plantas supone el uso de grandes cantidades de

hormigón armado, principalmente para los muros de contención necesarios para contener el terreno, soportando los correspondientes esfuerzos horizontales.

La siguiente figura muestra la disminución en energía primaria y emisiones derivada del menor consumo de materiales. En el cálculo no se ha evaluado el efecto disuasorio en el uso del vehículo privado que esta medida conlleva, por lo que es de esperar que el impacto de la medida en términos globales sea aún mayor. Asimismo se ha supuesto que el consumo de energía final para la climatización de los edificios no cambiaría sustancialmente al eliminar el parking, ya que se trata de un espacio no habitable.

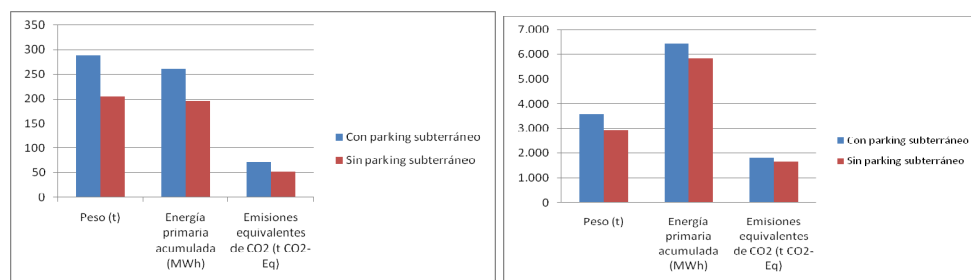


Figura 5.27. Comparación del impacto energético y medioambiental de los materiales con y sin parking subterráneo en la vivienda unifamiliar (izqda.) y en el bloque de viviendas (dcha.)

En la vivienda unifamiliar analizada la supresión del parking subterráneo, conllevaría una reducción del 25% de la superficie de la vivienda, con una reducción del 29% en su peso, evitando, entre otros materiales, el uso de 66,6 toneladas de hormigón, contabilizando tanto el hormigón armado como el hormigón en masa del forjado en contacto con el terreno y de los muros de contención y pilares del parking. Considerando todo el ciclo completo de los materiales evitados, la disminución de la demanda de energía primaria acumulada sería de 65,6 MWh, evitando la emisión de 18,9 toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub>, lo que equivale aproximadamente a las emisiones de CO<sub>2</sub> de un vehículo en 110.000 km. En otras palabras, las emisiones asociadas a la construcción del parking son casi la mitad de las emisiones producidas por el vehículo en toda su vida útil.

Por lo que respecta al bloque de viviendas, los ahorros obtenidos son comparativamente algo menores. En este caso, la reducción tanto en peso como en superficie del bloque sería del 19%, obteniendo una disminución de los impactos comparativamente menor. Por tanto, la efectividad de esta medida es menor conforme el ratio que representa la superficie de parking respecto a la superficie total del edificio disminuye, como es el caso del bloque de viviendas analizado, cuyo ratio es del 19% frente al 25% del unifamiliar.

Un aspecto a reseñar es que la inversión asociada para la puesta en marcha de esta medida en nuevas edificaciones sería nula, produciendo un ahorro económico en materiales estimado en algo más de 10.000€ para la vivienda unifamiliar y de más de 84.000€ para el bloque de viviendas.



### 5.2.5.3. Adosado de los edificios

A través de la envolvente del edificio en contacto con el exterior se producen las pérdidas térmicas del edificio (principalmente durante los meses de invierno), así como sus ganancias térmicas (principalmente durante los meses de verano). Por ello, la minimización de la superficie del edificio expuesta a las condiciones ambientales supone generalmente una disminución de las pérdidas en invierno, y del exceso de ganancias en verano, lo que conlleva una reducción de los consumos de energía final del edificio.

Una técnica para conseguir minimizar la envolvente exterior de los edificios es construir edificios adosados. De esta manera, la superficie de contacto entre los edificios (superficies adosadas) se puede considerar adiabática, lo que conlleva una importante modificación en las condiciones de contorno asociadas a las ecuaciones de transferencia de calor a resolver durante la simulación energética del edificio.

En la Figura 5.28 se comparan los consumos de energía final para climatización, expresados en kWh por m<sup>2</sup> y año, de los modelos de edificación analizados - adosados y sin adosar- en cada una de las 3 climatologías consideradas.

A la hora de simular la vivienda unifamiliar sin adosar, además de cambiar las correspondientes condiciones de contorno mencionadas anteriormente, se ha modificado la composición de la envolvente de la vivienda, sustituyendo las medianeras por muros exteriores, de modo que el edificio cumpla con los requisitos de limitación de demanda establecidos por la normativa vigente. En el caso de Madrid y Sevilla, esto supone pasar de 2 a 3 cm de aislamiento térmico, mientras que en el caso de Burgos, se pasa de 2 a 6 cm de aislamiento.

Por otra parte, a la hora de simular el bloque de viviendas adosado, tan sólo se han modificado las condiciones de contorno, manteniendo la misma composición, y por tanto, cumpliendo con mayor holgura la normativa.

Por lo expuesto anteriormente es de esperar que la disminución del impacto en materiales que supone el adosado no sea muy significativa. De hecho, considerando sólo los materiales, para el caso de la vivienda unifamiliar, la disminución en la demanda de energía primaria y en las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> está en un rango de 1,2 a 9,8 MWh, y de 0,3 a 2,5 toneladas respectivamente.

Sin embargo, tal como muestra Figura 5.28, el adosado supone una importante disminución del consumo de energía final para climatización en el unifamiliar.

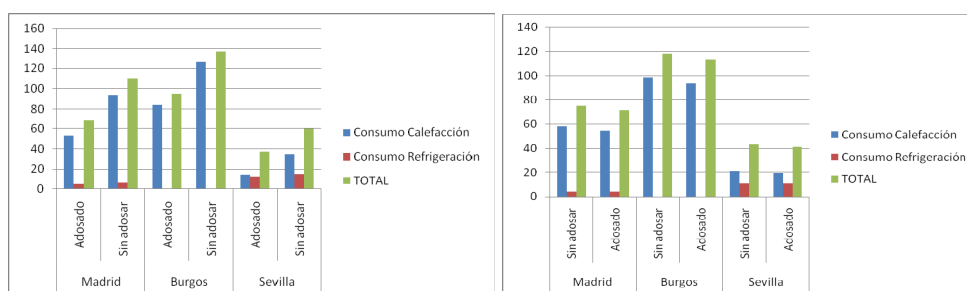


Figura 5.28. Consumos de energía final para climatización en la vivienda unifamiliar (izqda.) y en el bloque de viviendas (dcha.) adosados y sin adosar

La vivienda unifamiliar adosada supone una reducción del consumo de calefacción en un rango de 20 a 42,2 kWh por m<sup>2</sup> y año (lo que en términos porcentuales supone un rango del 33% al 58%) y hasta 2,5 kWh por m<sup>2</sup> y año (hasta el 23%) en el consumo de refrigeración, en función de la climatología considerada. Así, la reducción en calefacción es mayor en Burgos debido a su mayor severidad climática invernal, mientras que en el caso de la refrigeración la mayor reducción se produce en Sevilla, por su mayor severidad climática en verano. En cualquier caso, en las 3 climatologías, la reducción es mayor en calefacción que en refrigeración, lo que significa que el adosado tiene un mayor efecto sobre las pérdidas que sobre las ganancias perjudiciales.

Sin embargo, al analizar los resultados del bloque de viviendas adosado, tan sólo se obtienen reducciones en el consumo de calefacción de 1,7 a 4,7 kWh por m<sup>2</sup> y año (lo que en términos porcentuales supone un rango del 5% al 8,8%), manteniéndose prácticamente iguales los consumos de refrigeración.

La gran diferencia existente entre los dos modelos se debe al distinto ratio que supone en cada uno de ellos la superficie adosada con respecto a la superficie total de su envolvente térmica (un 41% en el unifamiliar y un 6% en el bloque de viviendas), debido a las diferencias geométricas de los dos modelos. Otro aspecto a destacar es que al analizar los resultados obtenidos para los dos modelos sin adosar, los consumos del unifamiliar son claramente superiores a los del bloque de viviendas, lo que refuerza la importancia de adosar los unifamiliares.

Al igual que sucedía con la medida anterior, el adosado de las nuevas edificaciones no supone ninguna inversión adicional, sino todo lo contrario, ya que conlleva un cierto ahorro económico debido a la posible reducción de materiales, además de una pequeña disminución en la ocupación del terreno.

#### **5.2.5.4. Elección del espesor de aislamiento convencional óptimo**

Numerosos estudios desarrollados a nivel europeo (Ziegler M., Bättig R., 2009; Egenhofer C., et al., 2006) remarcan la importancia del aislamiento térmico para conseguir una reducción de emisiones en los edificios. Las pérdidas de calor a través de la envolvente de los edificios conllevan más de dos terceras partes de las pérdidas totales de los edificios (Ibañez M., Rosell J.R., Rosell J.I., 2005). El correcto aislamiento de la envolvente reduce los flujos térmicos indeseados entre el interior y el exterior del edificio, y evita la formación de condensaciones, así como la pérdida de confort térmico debido a temperaturas radiantes muy frías o calientes en la cara interna de las paredes, ya que si la pared está convenientemente aislada, la temperatura de su cara interna será similar a la temperatura de la estancia.

Además la ubicación del aislamiento térmico en el cerramiento repercute directamente sobre la inercia térmica del edificio y en el confort obtenido. De esta manera, si el aislamiento se coloca en la cara interior del cerramiento, la inercia térmica es muy baja, disminuyendo el tiempo y la energía necesaria para calentar el edificio, pero aumentando la posibilidad de que se produzcan sobrecalentamientos y fluctuaciones indeseadas en la temperatura de las distintas estancias. Por el contrario, si el aislamiento se coloca en la cara exterior del cerramiento, a pesar de que el edificio tarda más tiempo en calentarse, las fluctuaciones se atenúan al aumentar la inercia térmica, y se produce generalmente una reducción del consumo de energía, que en climatologías mediterráneas puede llegar a alcanzar el 20% (Anastaselos D., Giama E., Papadopoulos A.M., 2009).

Es importante calcular correctamente el espesor de aislamiento para minimizar tanto los impactos asociados a la climatización como los derivados de la fabricación, transporte y disposición final del propio aislamiento. Un aislamiento sobredimensionado incrementará la energía incorporada en los materiales del edificio sin producir disminuciones significativas en la climatización del edificio, además de aumentar de un modo considerable el coste económico asociado.

La Figura 5.29 y la Figura 5.30 muestran para las 3 climatologías analizadas los consumos de energía final para climatización y totales del edificio, considerando el aislamiento mínimo de los cerramientos establecido por la normativa vigente frente a distintos incrementos de +1 cm, +2 cm, +5 cm, +10 cm y +20 cm sobre el espesor de dicho aislamiento en todos los cerramientos. En todos los casos, se supone que se utiliza como aislamiento poliestireno expandido (EPS) o extruido (XPS).

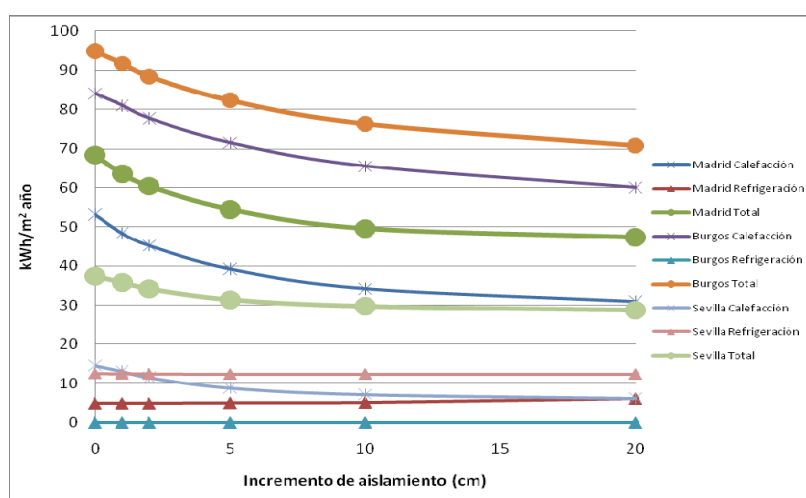


Figura 5.29. Evolución del consumo de energía final en función del incremento en el espesor de aislamiento de los cerramientos de la vivienda unifamiliar

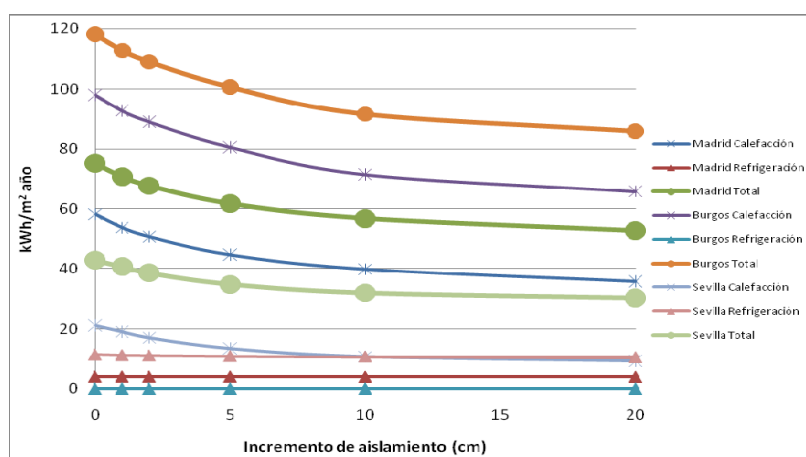


Figura 5.30. Evolución del consumo de energía final en función del incremento en el espesor de aislamiento de los cerramientos del bloque de viviendas

Obviamente, al aumentar el espesor del aislante utilizado en cada cerramiento de los edificios, disminuye la demanda energética y, por tanto, el consumo de climatización, si bien se puede observar una saturación en dicho consumo conforme aumenta el aislamiento. Tal como muestran la Figura 5.29 y la Figura

5.30, se observa una disminución en el consumo de energía final para calefacción, a la vez que se produce un ligero aumento del consumo final de refrigeración, como consecuencia de la mayor dificultad para evacuar las cargas internas de los edificios.

En todas las climatologías, se observa que el efecto del incremento de aislamiento sobre el consumo final en refrigeración es despreciable frente al efecto sobre el consumo final en calefacción. Por ello, el ahorro obtenido al aislar será mayor en climatologías con alta severidad climática invernal.

Si se compara el espesor de aislamiento mínimo frente al espesor óptimo (que se calculará posteriormente), el ahorro de energía final está en un rango de 6 a 20 kWh por m<sup>2</sup> y año para la vivienda unifamiliar, y de 8,2 a 28 kWh por m<sup>2</sup> y año para el bloque de viviendas. En ambos casos, el ahorro es menor en Sevilla y mayor en Burgos, por lo expuesto anteriormente.

En la Figura 5.31 se comparan los consumos de energía final para climatización y totales, en el unifamiliar sin aislar y aislado, con el espesor mínimo establecido por la normativa.

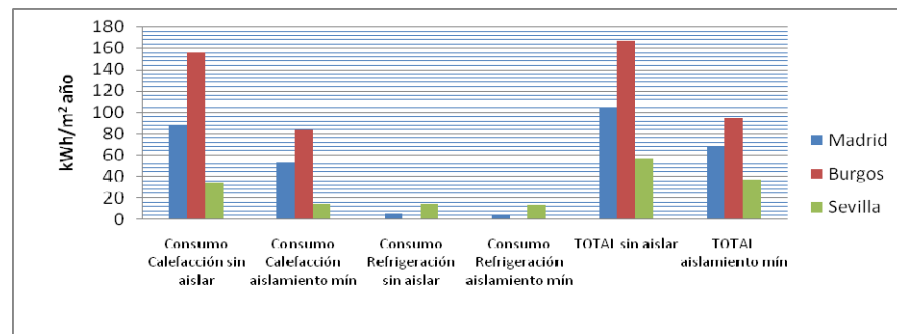


Figura 5.31. Comparación del consumo de energía final de la vivienda unifamiliar sin aislar y con el aislamiento mínimo establecido por la normativa vigente

Como se puede observar en la Figura 5.31, el ahorro de energía final obtenido en la vivienda unifamiliar está en un rango de 19,9 a 72,1 kWh por m<sup>2</sup> y año, obteniendo valores similares para el bloque de viviendas. En cualquier caso, estas cifras son claramente superiores a las obtenidas anteriormente, debido a la saturación que presenta el consumo de energía final a medida que aumenta el espesor de aislamiento.

Todas las figuras anteriores se han centrado en el efecto que tiene el incremento de aislamiento sobre el consumo de energía final de climatización. No obstante, dicho incremento conlleva también un evidente aumento del material aislante empleado, y por tanto, de la energía primaria incorporada y las emisiones asociadas a su fabricación, transporte y disposición final.

Dicho aumento se puede modelizar linealmente, tal como se muestra en la siguiente tabla. La diferencia que se observa entre las climatologías se deriva de que el espesor de aislante inicial requerido en Burgos para cumplir la normativa es superior al requerido en Madrid y Sevilla, tal como se indicó en el apartado 5.1.1.

<i>Energía primaria incorporada en MATERIALES = m x Incremento Aislante + b</i>			
Madrid y Sevilla		Burgos	
m	b	m	b
0,632	48,43	0,632	49,37
<i>Emissiones equivalentes de CO<sub>2</sub> de MATERIALES = m x Incremento Aislante + b</i>			
Madrid y Sevilla		Burgos	
m	b	m	b
0,158	13,19	0,158	13,19

Tabla 5.6. Modelización de la energía primaria incorporada (en kWh/m<sup>2</sup> año) y las emisiones asociadas a los materiales (en kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> año) de la vivienda unifamiliar

Tal como muestra la Figura 5.32, se observa que las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> de la vivienda unifamiliar, considerando todas las etapas de su vida útil, presentan un valor mínimo (y por lo tanto, óptimo) para un incremento en el espesor de aislamiento de 10 cm para Madrid. Dicho valor se incrementa hasta los 13 cm en el caso de Burgos y se reduce hasta los 5 cm en el caso de Sevilla, debido a las diferentes características climáticas, obteniendo valores parecidos para el caso del bloque de viviendas.

Asimismo, el espesor de aislamiento que minimiza la demanda total de energía primaria acumulada presenta valores muy similares a los anteriormente descritos, por lo que dichos valores pueden considerarse como valores óptimos.

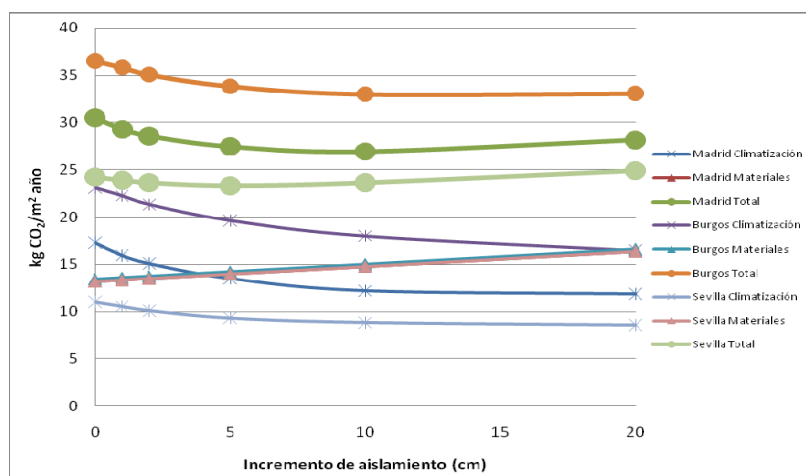


Figura 5.32. Evolución de las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> del edificio en función del incremento en el espesor de aislamiento de los cerramientos de la vivienda unifamiliar

Para obtener la disminución en la demanda de energía primaria y emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> en toda la vida útil del edificio, se han considerado 2 escenarios:

- Escenario 1º: Disminución que se produce al aislar con el espesor óptimo - obtenido de la figura anterior- un edificio que inicialmente estuviera sin aislar.
- Escenario 2º: Disminución producida al aislar con el espesor óptimo - obtenido de la figura anterior- un edificio que inicialmente tuviera el espesor mínimo exigido por la normativa.

Así para el caso de la vivienda unifamiliar, en el primer escenario, la energía primaria total del ciclo de vida disminuye en un rango de 29,3 a 102,6 kWh/m<sup>2</sup> y año, mientras que en el segundo, la disminución se reduce a un rango de 4,6 a 16,6 kWh/m<sup>2</sup> y año; obteniendo valores algo más elevados para el bloque de viviendas.

Respecto a la inversión necesaria, para el unifamiliar se situaría en un rango de 6.000 a 11.500€ en el primer escenario, y de 3.000 a 7.700€ en el segundo; mientras que para el bloque de viviendas, por economía de escala, se obtendrían valores por vivienda comparativamente más bajos.

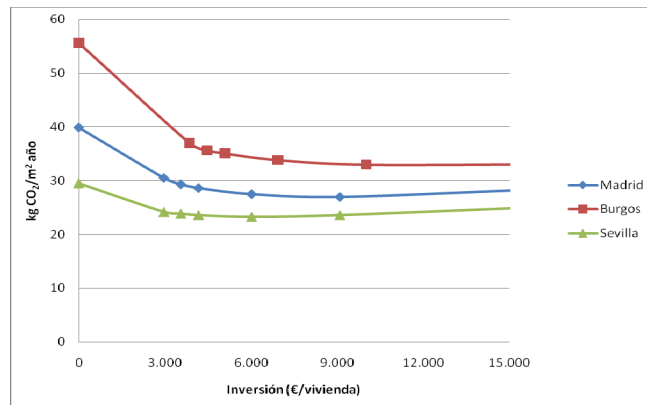


Figura 5.33. Evolución de las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> del edificio en función de la inversión en aislar los cerramientos de la vivienda unifamiliar

La Figura 5.33 presenta las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> de la vivienda unifamiliar en función de la inversión económica efectuada para aislar la vivienda. En el caso de Sevilla se observa que a partir de 6.000 € (que se corresponde con el incremento óptimo mencionado anteriormente de 5 cm de aislamiento respecto al mínimo normativo) las emisiones del ciclo de vida empiezan a aumentar. Este valor aumenta hasta los 9.000 € en Madrid (incremento de 10 cm respecto a la normativa) y hasta los 11.500 € en Burgos (incremento de 10 cm respecto a la normativa). En cualquier caso se puede observar como a partir de los 3.000-4.000 €/vivienda, la disminución en las emisiones es menor, por lo que el retorno de la inversión es mayor.

Todo lo anterior es aplicable únicamente a edificios residenciales. Sin embargo, en el caso de los edificios terciarios con cargas internas elevadas, la estrategia debería ser justamente la contraria: diseñar el edificio para que pueda perder calor a través de su envolvente, protegiéndole de la radiación solar mediante elementos de protección externos. Una solución que encajaría perfectamente con este enfoque sería el diseño de un edificio aleteado, donde unas aletas, adecuadamente dimensionadas y ubicadas con posibilidad de poder ponerse y quitarse en un momento determinado, contribuyeran a la pérdida de calor por convección del edificio, a la vez que constituyeran un elemento de protección solar tipo alero para los acristalamientos del edificio. Otras soluciones serían los sistemas solares de enfriamiento gratuito con aire exterior y las chimeneas solares combinadas con la entrada de aire por tuberías enterradas (Turégano J.A., Velasco M.C., Martínez A., 2009) que permiten la disipación de calor del aire exterior al suelo antes de su entrada al edificio.

### 5.2.5.5. Sustitución de aislamiento convencional por aislamiento natural

En este apartado se analiza la repercusión sobre el impacto global del edificio de tres materiales aislantes: EPS/XPS (poliestireno expandido/extruido), corcho natural y fibra de celulosa reciclada.

Tal como se demostró en el capítulo 3, el uso de materiales aislantes de origen natural y/o reciclado en sustitución de los materiales más convencionales como el poliestireno, el poliuretano y las lanas minerales conlleva una disminución de los impactos energéticos y ambientales. Así, la energía primaria incorporada y emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes por unidad de peso en la fibra de celulosa reciclada son un 90% y un 95% inferiores respectivamente a las del EPS. Esta diferencia se reduce, no obstante, al considerar los impactos por unidad de volumen, debido a las diferencias en la densidad de dichos aislantes. Mientras el EPS tiene una densidad de 30 kg/m<sup>3</sup>, la densidad de la fibra de celulosa es de 50 kg/m<sup>3</sup>, y la del corcho supera los 90 kg/m<sup>3</sup>.

A pesar de las diferencias que se producen al analizar el impacto por cantidad (peso o volumen) de material aislante, cuando se analiza el impacto sobre el conjunto del edificio, los ahorros obtenidos son mucho más reducidos.

Esto es debido al reducido impacto que tiene el aislante sobre el conjunto del edificio. Por ejemplo, en la vivienda unifamiliar analizada, el poliestireno expandido utilizado como aislante representa el 9,6%-14,7% de la energía total incorporada en los materiales, y el 2,4%-3,7% de las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> totales de los materiales, correspondiendo los valores más elevados a las climatologías donde se requiere más aislamiento, debido a la mayor severidad climática invernal. Asimismo en el bloque de viviendas se obtienen cifras similares, que, en cualquier caso, limitan el ahorro potencial máximo, al sustituir poliestireno por otro material aislante de menor impacto.

Además, considerando la distinta conductividad (K) de los materiales aislantes, se observa que para garantizar la misma resistencia térmica (R) en los cerramientos de los edificios, el espesor (esp) de corcho o de fibra de celulosa a considerar debe calcularse para cada cerramiento a partir de la siguiente expresión.

$$R_{\text{corcho/celulosa}} = R_{\text{EPS}} \Rightarrow \text{esp}_{\text{corcho/celulosa}} / K_{\text{corcho/celulosa}} = \text{esp}_{\text{EPS}} / K_{\text{EPS}}$$

Teniendo en cuenta que la conductividad del corcho y de la fibra de celulosa son algo superiores a la del EPS, se requerirá un espesor mayor de estos aislamientos naturales para que la comparación sea coherente, manteniendo así la misma resistencia térmica, y por tanto, la misma transmisividad, y el mismo consumo de energía final para la climatización de los edificios. A modo de ejemplo en la Tabla 5.7, se indican los espesores considerados para el análisis de la vivienda unifamiliar.

en m	Madrid y Sevilla			Burgos		
	EPS (0,0375 W/mK)	CORCHO (0,049 W/mK)	FIBRA CELULOSA (0,04 W/mK)	EPS (0,0375 W/mK)	CORCHO (0,049 W/mK)	FIBRA CELULOSA (0,04 W/mK)
Muro exterior	0,03	0,039	0,032	0,06	0,078	0,064
Medianera	0,02	0,026	0,021	0,02	0,026	0,021
Forjado interior	0,03	0,039	0,032	0,03	0,039	0,032
Forjado exterior	0,04	0,052	0,043	0,04	0,052	0,043
Cubierta	0,04	0,052	0,043	0,1	0,131	0,107

Tabla 5.7. Espesor de material aislante para garantizar la misma transmisividad de los cerramientos de la vivienda unifamiliar

Al comparar la demanda de energía primaria y emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> resultantes de considerar el consumo final de climatización y los materiales de los edificios se observa que la diferencia entre los distintos materiales aislantes es mínima, tal como muestra la Figura 5.34.

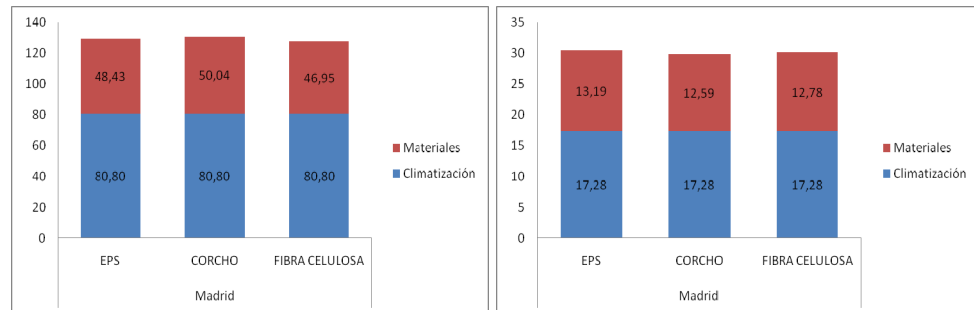


Figura 5.34. Consumo de energía primaria en kWh/m<sup>2</sup>año (izqda.) y emisiones equivalentes en kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>año (dcha.) para distintos tipos de materiales aislantes en la vivienda unifamiliar en Madrid

En la Figura 5.34, a pesar de que al sustituir EPS por corcho, la energía primaria aumenta en términos globales, conviene recordar que el 53% de la energía primaria del corcho tiene un origen renovable, en contraste con el 1% de energía primaria renovable del EPS. Por ello, dicha sustitución conlleva un evidente descenso de la energía primaria no renovable. Analizando las emisiones, al sustituir EPS por corcho, las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> correspondientes a los materiales disminuyen el 4,6%-6,9%, mientras que las correspondientes al conjunto de la vivienda (considerando los materiales y el consumo de energía final total) se reducen tan sólo un 1,7%-2,3%. Del mismo modo, al sustituir EPS por fibra de celulosa, la energía primaria incorporada en los materiales se reduce en un 3%-4,6%, mientras que la energía primaria correspondiente a los materiales y el consumo final total de la vivienda disminuye en un 1-1,3%. En todos los casos, la reducción depende de la localización, siendo mayor en las climatologías donde se requiere mayor espesor de aislante. Por su parte, en el bloque de viviendas, aplicando los mismos criterios de sustitución se llegaría a las mismas conclusiones.

De los resultados anteriores se deduce que, si bien el uso de materiales aislantes naturales o reciclados es siempre recomendable, los impactos evitados son reducidos en comparación con los obtenidos mediante la aplicación de otras medidas, que tendrían, por tanto, una mayor prioridad. Además el actual nivel de producción de este tipo de aislantes sería insuficiente para plantear su uso en todas las edificaciones.

#### 5.2.5.6. Sustitución de ladrillos exteriores convencionales por bloques cerámicos de arcilla aligerada

En este apartado se analiza la disminución global de los impactos en los edificios al sustituir los ladrillos macizos convencionales, que constituyen la cara externa de los muros exteriores y medianeras, por bloques cerámicos de arcilla aligerada. Estos bloques poseen una conductividad térmica un 70% inferior a la de los ladrillos, con un 58% menos de peso, y unos impactos por unidad de peso y por unidad de volumen más reducidos, tal como se demostró en el capítulo 3.

Dicha sustitución se plantea de modo que el consumo de energía final para la climatización de los edificios no se vea afectado. Para ello, es necesario que la



transmisividad, y por tanto, la resistencia térmica (R) de los cerramientos no cambie. Teniendo en cuenta el espesor (esp) y la conductividad (K) de los materiales objeto de la sustitución, debe cumplirse la siguiente expresión para cada cerramiento:

$$R_{\text{ladrillo}} + R_{\text{EPS}} = R_{\text{bloq\_ceram}} + R'_{\text{EPS}}$$

$$\text{esp}_{\text{ladrillo}} / K_{\text{ladrillo}} + \text{esp}_{\text{EPS}} / K_{\text{EPS}} = \text{esp}_{\text{bloq\_ceram}} / K_{\text{bloq\_ceram}} + \text{esp}'_{\text{EPS}} / K_{\text{EPS}}$$

En la Tabla 5.8 y la Tabla 5.9, se muestran las especificaciones de los materiales consideradas para el cálculo de la resistencia térmica de los cerramientos correspondientes.

	Ladrillo (macizo)		Aislante EPS		Bloque cerámico		Aislante EPS		Resistencia térmica (m <sup>2</sup> K/W)
	Espesor (m)	Conductividad (W/mK)	Espesor (m)	Conductividad (W/mK)	Espesor (m)	Conductividad (W/mK)	Espesor (m)	Conductividad (W/mK)	
Muro exterior	0,115	0,991	0,03 (Madrid y Sevilla); 0,06 (Burgos)	0,0375	0,190	0,306	0,01105 (Madrid y Sevilla); 0,04105 (Burgos)	0,0375	0,916 (Madrid y Sevilla); 1,716 (Burgos)
Medianera	0,115	0,991	0,02	0,0375	0,190	0,306	0,00105	0,0375	0,649

Tabla 5.8. Espesor de material aislante para garantizar la misma transmisividad de los cerramientos de la vivienda unifamiliar

En la vivienda unifamiliar, se observa que al sustituir los ladrillos por bloques cerámicos de 190 mm de espesor, el espesor de aislamiento necesario para mantener la misma resistencia térmica, disminuye. En este caso, a efectos de simplificar los cálculos posteriores, se asumirá que no será necesario aislamiento EPS para las medianeras; mientras que para los muros exteriores se considerará 1 cm de aislante EPS en Madrid y Sevilla, y 4 cm en Burgos.

	Ladrillo (perforado)		Aislante EPS		Bloque cerámico		Aislante EPS		Resistencia térmica (m <sup>2</sup> K/W)
	Espesor (m)	Conductividad (W/mK)	Espesor (m)	Conductividad (W/mK)	Espesor (m)	Conductividad (W/mK)	Espesor (m)	Conductividad (W/mK)	
Muro exterior	0,125	0,512	0,02 (Madrid y Burgos); 0,01 (Sevilla)	0,029	0,14	0,324	0,01455 (Madrid y Burgos); 0,00454 (Sevilla)	0,029	0,934 (Madrid y Burgos); 0,589 (Sevilla)

Tabla 5.9. Espesor de material aislante para garantizar la misma transmisividad de los cerramientos del bloque de viviendas

En el bloque de viviendas, se opta por un bloque cerámico de 140 mm de espesor, haciendo las mismas simplificaciones en cuanto al espesor de aislante necesario. Conviene destacar que, en este caso, el ladrillo perforado utilizado posee mejores propiedades aislantes que el ladrillo macizo utilizado en el unifamiliar.

El impacto del conjunto ladrillos + aislante en los muros exteriores y medianeras de los edificios puede resultar bastante significativo. En el caso de la vivienda unifamiliar representa aproximadamente el 21% de la energía incorporada y las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> totales asociadas a los materiales. Sin embargo, en el bloque de viviendas, dicho porcentaje se reduce a algo más de la mitad, debido a la menor densidad de los ladrillos perforados, que además es similar a la de los bloques cerámicos.

Los resultados de la sustitución en la vivienda unifamiliar son una reducción del peso total del edificio del 5,6%, un ligero aumento de la energía primaria total del 0,9-1,1% (incrementándose la fracción renovable y disminuyendo la fracción no-renovable) y una disminución de las emisiones totales equivalentes de CO<sub>2</sub> del 7-10%.

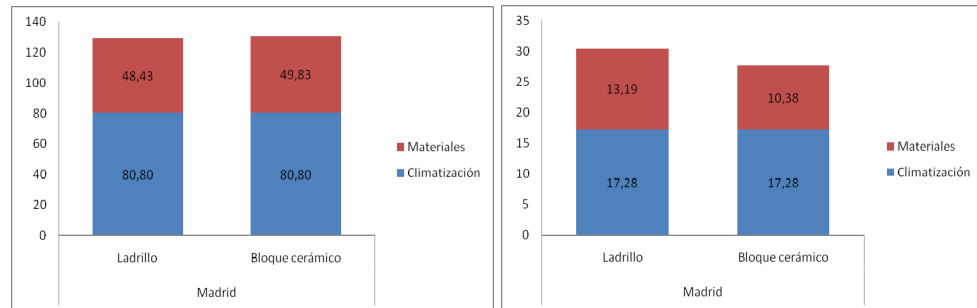


Figura 5.35. Consumo de energía primaria en kWh/m<sup>2</sup>año (izqda.) y emisiones equivalentes en kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>año (dcha.) para las soluciones ladrillo+aislante y bloque cerámico+aislante en la vivienda unifamiliar en Madrid

Por otra parte, en el bloque de viviendas, los resultados muestran unos beneficios muy reducidos, claramente inferiores a los anteriores, debido a las mejores cualidades del ladrillo perforado, ya comentadas anteriormente.

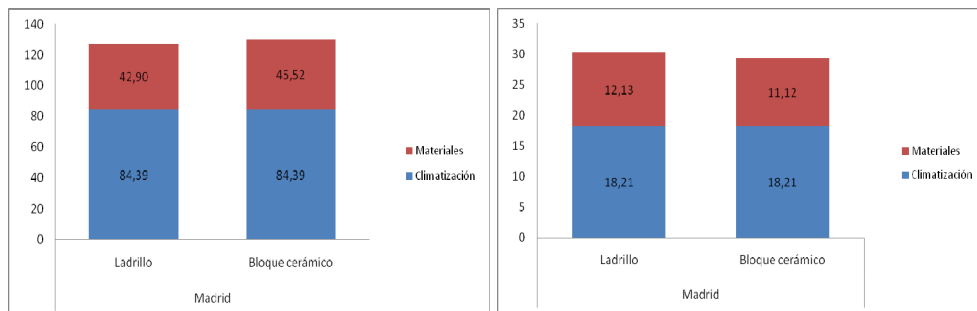


Figura 5.36. Consumo de energía primaria en kWh/m<sup>2</sup>año (izqda.) y emisiones equivalentes en kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>año (dcha.) para las soluciones ladrillo+aislante y bloque cerámico+aislante en el bloque de viviendas en Madrid

Conviene reseñar que los ahorros anteriores podrían ser algo mayores considerando un menor valor de conductividad térmica del bloque cerámico. A pesar de que en el mercado existen bloques de menor transmisividad, el valor seleccionado ha sido el considerado en la normativa nacional vigente. Respecto al coste, en la actualidad, los precios del ladrillo y los bloques cerámicos son similares, por lo que teniendo en cuenta el ahorro en aislante derivado del uso de dichos bloques, se puede decir que la sustitución planteada no conlleva una inversión económica en obra nueva, mientras que en edificios a rehabilitar el coste sería de 15.000€ en el unifamiliar y de 250.000€ en el bloque de viviendas.

Una ventaja adicional de los bloques cerámicos es que en viviendas unifamiliares pueden utilizarse -al igual que el ladrillo- como elemento estructural, puesto que su resistencia a compresión supera los 50 kp/cm<sup>2</sup>. Por ello, se podría plantear la sustitución de la estructura portante convencional basada en el uso de pilares por una estructura basada en muros de carga capaces de soportar los forjados de los edificios. Obviamente los muros de carga deben tener un espesor superior al de los muros no estructurales convencionales, situándose en al menos dos fachadas del edificio, añadiéndose, en caso necesario, muros de carga adicionales paralelos a los de las fachadas. A modo de ejemplo, la eliminación de los pilares produciría en la vivienda unifamiliar una disminución adicional sobre los valores que aparecen en la Figura 5.35, de 1,4 kWh-Eq/m<sup>2</sup> año en energía primaria y de 0,5 kg CO<sub>2</sub>-Eq/ m<sup>2</sup> año en emisiones.

Conviene destacar que el correcto diseño y ejecución de los muros de carga es un punto fundamental para evitar el apoyo de la estructura en tabiques o muros no portantes, produciendo deformaciones estructurales que dan lugar a grietas e infiltraciones que incrementan las necesidades de mantenimiento del edificio, pudiendo llegar a disminuir su vida útil. En diversas ocasiones, un diseño o ejecución inadecuados, unido al derribo por parte del usuario de tabiques estructurales -muy utilizados en viviendas antiguas- con objeto de modificar la distribución de espacios sin tener conocimiento de ello, ha ocasionado un cierto recelo entre los diseñadores y usuarios de los edificios.

#### **5.2.5.7. Sustitución de cubiertas convencionales por cubiertas vegetales**

Las cubiertas de los edificios están sometidas a grandes fluctuaciones térmicas, que se acrecientan conforme aumenta la altura de los edificios, y a altos niveles de radiación solar durante los meses de verano, especialmente si se trata de cubiertas horizontales u orientadas al sur con bajos ángulos de inclinación.

Las cubiertas vegetales constituyen una solución ecológica y económica para contrarrestar la “jungla de hormigón y asfalto” en las grandes ciudades, contribuyendo a reducir la situación de isla de calor que se produce en los meses de verano como consecuencia de la acumulación de calor en la enorme masa de hormigón y asfalto, que dificulta la disipación del calor durante la noche. En este sentido, estudios realizados en Toronto afirman que si el 50% de los edificios de la ciudad tuviera cubiertas vegetales se obtendría una reducción de 1°C en la temperatura ambiente de más de un tercio de la ciudad (Krayenhoff S., Bass B., 2003).

Por tanto, se consigue mejorar el microclima del entorno, ofreciendo un enfriamiento evaporativo, y mejorando la calidad del aire, al producir oxígeno y absorber dióxido de carbono. Estas cubiertas pueden llegar a fijar 375 gramos de carbono por metro cuadrado y año (Getter K.L., et al., 2009), que se reparte entre la vegetación superficial (168 gramos), la vegetación enterrada (107 gramos) y el sustrato (100 gramos).

Las cubiertas vegetales, muy extendidas en los países centroeuropeos, proporcionan además un buen aislamiento térmico y acústico, disminuyendo las oscilaciones extremas de temperatura y humedad debido a su alta inercia térmica, evitando el sobrecalentamiento en verano y reduciendo las pérdidas en invierno. Esto repercute positivamente en el confort térmico del edificio, disminuyendo el consumo de energía final para climatización. En cualquier caso, los ahorros

obtenidos con respecto a una cubierta convencional dependerán fuertemente del nivel de aislamiento que posea dicha cubierta (Niachou A., et al., 2001). Si éste es el adecuado, como es el caso de los modelos de edificación analizados, los ahorros se obtienen principalmente en verano, con una disminución del 6,2% en el consumo de refrigeración y tan sólo del 0,12% en el consumo de calefacción (Saiz S., et al., 2006) en bloques de viviendas de 7-8 plantas. Hay que remarcar que estos ahorros son, en cualquier caso, superiores a los que se conseguirían por medio de tejados blancos reflectivos, en los que el consumo para la refrigeración de los edificios disminuiría en un 4%, pero aumentaría un 0,7% el consumo para la calefacción (Saiz S., et al., 2006). Por tanto, las cubiertas vegetales son preferibles frente a las cubiertas blancas, ya que conllevan mayores ahorros en los consumos de energía final de los edificios, además de constituir un sumidero urbano de dióxido de carbono.

Tal como muestra la siguiente figura, la reducción de la demanda pico de refrigeración es mayor en las plantas más próximas a la cubierta. Por ello, conforme menor sea el número de plantas del edificio, los porcentajes de disminución obtenidos serán más elevados.

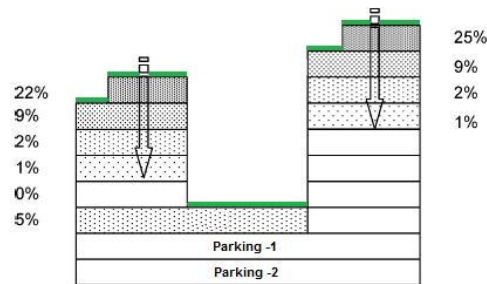


Figura 5.37. Porcentaje de reducción del pico de demanda de refrigeración en un bloque de viviendas con cubierta vegetal (Fuente: Saiz S., et al., 2006)

Conviene reseñar que la tierra y la vegetación de la cubierta no suelen suponer una carga importante para la estructura del edificio, ya que un espesor de suelo entre 8 y 12 cm suele ser suficiente. Por ello, a pesar de que siempre es preciso verificar la viabilidad estructural, las cubiertas vegetales constituyen una solución perfectamente aplicable en la rehabilitación de edificios, a diferencia de otras soluciones como las cubiertas aljibes, donde el peso del agua añade 100 kg por cada metro cuadrado de cubierta y por cada centímetro de altura de agua.

La selección de las especies de la cubierta es de vital importancia para garantizar el tapizado vegetal tanto en los meses de verano como en los de invierno con unos mínimos requisitos hídricos y de mantenimiento. En este sentido, una combinación de especies de plantas de tipo perenne, resistentes a las inclemencias meteorológicas, y con raíces poco profundas, como por ejemplo, la *Sedum Sempervivum*, la *Opuntia aciculares* y la *Larrea divaricata*, resulta idónea para la mayor parte de las climatologías en España (Saiz S., et al., 2006).

La cubierta vegetal se compone principalmente del sustrato de tierra vegetal, un material drenante como la arlita, una membrana impermeabilizante (polietileno, EPDM, etc.), así como de un material aislante (EPS, corcho, etc.) y la base estructural (hormigón, madera, etc.), tal como muestra la siguiente tabla.

Material	Espesor (m)	
Tierra vegetal ( $d < 2.050$ )	0,10	Capas consideradas en todos los modelos
Arlita	0,03	
Lámina EPDM (Etileno propileno dieno monómero)	0,002	
EPS Poliestireno Expandido 4 cm ( $0,037 \text{ W/mK}$ )	0,04	Base de la cubierta variable según el modelo
Forjado unidireccional entreligado de hormigón (Canto 250 mm)	0,25	
Enlucido de yeso ( $1.000 < d < 1.300$ )	0,02	

Tabla 5.10. Composición de la cubierta vegetal en la vivienda unifamiliar de Madrid y Sevilla

Como se puede comprobar, en la cubierta vegetal considerada en la vivienda unifamiliar se sustituye la teja cerámica, el mortero de cemento y el tabicón de ladrillo hueco doble por una capa de tierra vegetal, arlita y una lámina impermeabilizante de caucho sintético (EPDM). Para que la comparación sea correcta, no se modifica, por tanto, la “base” de la cubierta, constituida por el aislante térmico EPS, forjado de hormigón y enlucido de yeso, obteniendo así un valor similar de transmisividad en ambas cubiertas. Por su parte, en el bloque de viviendas, la única capa sustituida sería la grava rodada superficial.

En la vivienda unifamiliar de Madrid, el impacto de los materiales sustituidos por la cubierta vegetal se ve parcialmente compensado por el alto impacto de la lámina de EPDM, de modo que, por cada metro cuadrado de cubierta, el ahorro en energía primaria es de  $47,7 \text{ kWh/m}^2$  y la disminución en las emisiones es de  $19,6 \text{ kg CO}_2\text{-Eq/m}^2$ . La fijación de  $\text{CO}_2$  en la cubierta de la vivienda se estima en casi  $24 \text{ kg/año}$ . En cualquier caso, el efecto principal de la cubierta es la menor necesidad de climatización. Por cada metro cuadrado de cubierta se obtiene una disminución de  $221,33 \text{ kWh/m}^2$  en la energía primaria, bajando las emisiones en  $41,74 \text{ kg CO}_2\text{-Eq/m}^2$ . No obstante, a diferencia de los valores anteriores, este efecto depende mucho de la climatología, siendo más elevado cuanto mayor es la severidad climática de verano. De este modo, en Sevilla la disminución en la climatización conlleva una reducción de  $425,57 \text{ kWh/m}^2$  y de  $74,86 \text{ kg CO}_2\text{-Eq/m}^2$  respectivamente, mientras que en Burgos dicha disminución se reduce aproximadamente a la mitad en comparación con la obtenida en Madrid.

En la Figura 5.38 se analizan conjuntamente los aspectos anteriores, y se compara la repercusión de la sustitución de la cubierta sobre el impacto total anual de la vivienda unifamiliar ubicada en Sevilla, expresado por  $\text{m}^2$  de edificio y año.

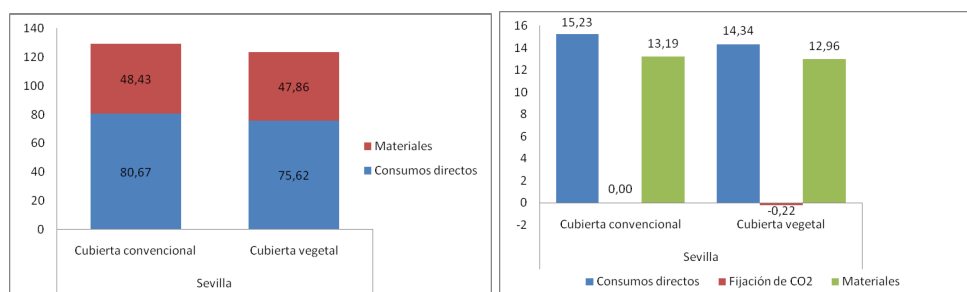


Figura 5.38. Consumo de energía primaria en  $\text{kWh/m}^2$  año (izqda.) y emisiones equivalentes en  $\text{kg CO}_2/\text{m}^2$  año (dcha.) para cubierta convencional y cubierta vegetal en la vivienda unifamiliar en Sevilla

Tal como muestra la siguiente figura, en el bloque de viviendas, los ahorros obtenidos son algo menores debido a que al tener un mayor número de plantas, el porcentaje que representa la superficie de la cubierta con respecto a la superficie de la envolvente térmica es un 6% inferior al del unifamiliar. Además, en este caso, al sustituir únicamente la capa de grava, el impacto en materiales no disminuye y se mantiene en los mismos valores, mientras que la fijación de CO<sub>2</sub> en la cubierta es de 272 kg/año.

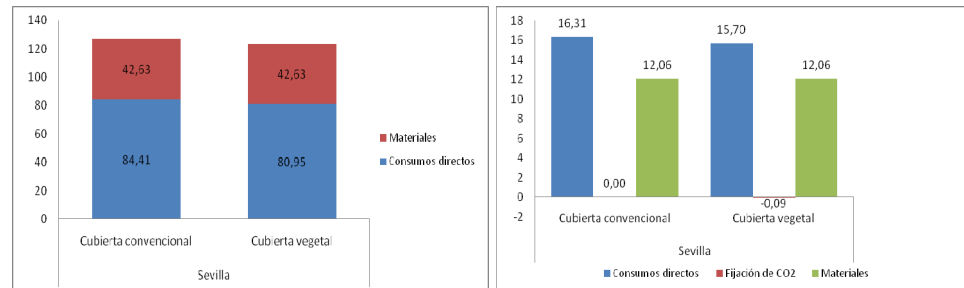


Figura 5.39. Consumo de energía primaria en kWh/m<sup>2</sup> año (izqda.) y emisiones equivalentes en kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> año (dcha.) para cubierta convencional y cubierta vegetal en el bloque de viviendas en Sevilla

A las ventajas anteriores hay que añadir que la cubierta vegetal con un coste aproximado sería de 73€ por metro cuadrado de cubierta resulta más económica que la cubierta convencional, cuyo coste se estima en 165€/m<sup>2</sup>. Además, en los dos modelos analizados, la cubierta vegetal conlleva un mínimo aumento de peso estimado en un 2-3%, por lo que no requiere un aumento de la estructura para soportar la pequeña sobrecarga introducida. Por todo ello, se considera que esta medida tendría carácter prioritario dentro de una estrategia de edificación sostenible, especialmente para edificios de poca altura, con una ratio superficie de cubierta/superficie de envolvente elevada, y que estén ubicados en climatologías con elevada severidad climática en verano, que es donde se obtienen los mayores beneficios en términos energéticos y ambientales.

#### 5.2.5.8. Utilización de materiales de construcción a base de clínker de menor impacto

Tal como se demostró en el Capítulo 3, la sustitución de materias primas (piedra caliza, arcilla, etc.) y combustibles (coque de petróleo, hulla, etc.) convencionales, por materias primas (cenizas volantes, escorias de alto horno, etc.) y combustibles (harinas cárnicas, neumáticos usados, etc.) alternativos, produce una disminución del impacto energético y ambiental del proceso de fabricación del clínker, que a su vez repercute en una mejora de todos los materiales que lo utilicen como materia prima, como el cemento y el hormigón.

En la vivienda unifamiliar los materiales a base de cemento y hormigón representan el 50% del peso, el 46% de la energía primaria incorporada en los materiales y el 51% de las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> asociadas a los materiales. Debido a su distinta composición, los impactos de dichos materiales son mayores para el bloque de viviendas, suponiendo el 62% del peso, el 66% de la energía primaria y el 74% de las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub>.

En este apartado se evalúa la repercusión en los dos modelos de edificación analizados del uso de productos de cemento y hormigón, producidos a base de clínker con un 80% de sustitución energética de combustibles fósiles por

combustibles alternativos de origen biomásico, que se aproxima a la realidad actual del sector cementero en Holanda.

En la Figura 5.40 se puede observar la disminución en energía primaria y emisiones asociadas al uso de productos basados en un clinker de menor impacto. Se ha supuesto que las propiedades físicas (conductividad, densidad, etc.) de los nuevos productos producidos a base de dicho tipo de clinker no presentan una variación sustancial con respecto a los productos producidos a base de clinker convencional, por lo que se supone que los consumos de energía final para la climatización de los edificios no se verán modificados.

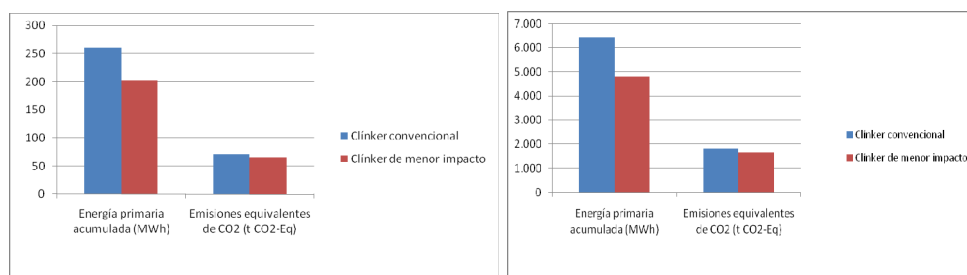


Figura 5.40. Impacto energético y medioambiental de los materiales en la vivienda unifamiliar (izqda.) y en el bloque de viviendas (dcha.) con productos de cemento y hormigón a base de clinker convencional y de clinker de menor impacto

Considerando el ciclo completo de los materiales sustituidos, en la vivienda unifamiliar se consigue reducir un 22,3% la demanda de energía primaria acumulada y casi un 8,3% las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> asociadas. Para el bloque de viviendas, debido a la mayor contribución de estos materiales, la reducción obtenida es algo mayor: 25,3% para la energía primaria y 9,4% para las emisiones.

La sustitución de materias primas y combustibles que se plantea en esta medida no conllevaría grandes cambios tecnológicos en las empresas cementeras, por lo que el nivel de inversión requerido no sería muy alto. No obstante, la aplicabilidad de esta medida en obra nueva está fuertemente condicionada por la creación una estrategia y un nuevo marco normativo que favorezca la valorización energética de residuos en la industria cementera.

### 5.2.6. Adecuación de la forma y tamaño del edificio

El tamaño y forma de los edificios tienen una influencia decisiva en sus impactos. La compacidad (C), definida como el cociente entre el volumen interior del edificio encerrado por la envolvente térmica (V) y la superficie de dicha envolvente térmica (S), es el parámetro habitualmente empleado para identificar la forma de un edificio.

$$C (m) = V (m^3) / S (m^2)$$

Es evidente que una mayor compacidad, o lo que es lo mismo, una menor superficie de envolvente para un mismo volumen interior, conllevará un menor intercambio térmico con el exterior. Por ello, en edificios ubicados en climatologías frías, donde interesa disminuir las pérdidas energéticas, el diseño propuesto debería maximizar la compacidad reduciendo al máximo la superficie de

envolvente para minimizar las pérdidas de calor y, por tanto, el consumo de energía final para calefacción.

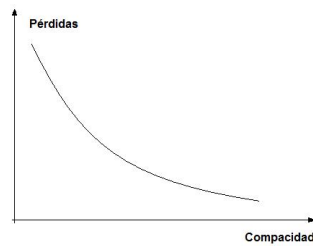


Figura 5.41. Relación entre la compacidad y las pérdidas en los edificios (Fuente: Turégano J.A., Velasco M.C., Martínez A., 2009)

No obstante, una mayor compacidad no es siempre beneficiosa, ya que en edificios situados en climatologías muy cálidas, donde sea prioritario favorecer las pérdidas a través de la envolvente, se debería maximizar la superficie de envolvente, como por ejemplo, aumentando la altura entre las plantas, lo que además permitiría mejorar el confort térmico de la zona habitable, debido a la mayor estratificación térmica conseguida. En cualquier caso, esta situación no se corresponde con la realidad del sector residencial en España, por lo que generalmente lo recomendable es aumentar la compacidad.

A modo de ejemplo, el valor de compacidad de la vivienda unifamiliar es de 1,27 m. Si se modificase su diseño, de modo que su compacidad disminuyera de 1,27 a 0,89, la demanda de energía para climatización de la vivienda podría pasar de 51 kWh/m<sup>2</sup> y año a 75 kWh/m<sup>2</sup> y año (Turégano J.A., Velasco M.C., Martínez A., 2009). Por ello, se deberían de promover los diseños compactos, sobretudo en edificios con cargas internas reducidas y ubicados en climatologías que no sean muy cálidas.

La actual tendencia al aumento en la superficie útil de los edificios se manifiesta especialmente en los unifamiliares ubicados en el extrarradio de los grandes núcleos de población, así como en las zonas rurales. Esta última circunstancia se debe en parte al cambio socio-laboral que en los últimos años se ha producido en las áreas rurales al desvincular las labores agropecuarias de la vivienda, lo que ha llevado consigo un aumento de la superficie habitable de las viviendas (Aranda A., Zabalza I., Scarpellini S., 2005).

La mayor superficie útil disponible, que conlleva normalmente una disminución en la compacidad, se traduce en un aumento tanto en el consumo de energía final para climatización como en los materiales de construcción utilizados. De este modo, al considerar una vivienda unifamiliar con una superficie total y útil un 20% mayor que la de la vivienda inicialmente analizada y la misma ocupación (3-4 personas), el peso de la estructura aumenta en un 11% y el peso total de los materiales de la vivienda se incrementa en un 18,7%, aumentando los impactos del ciclo de vida en energía primaria y CO<sub>2</sub> en un 23% aproximadamente, tal como muestra la Figura 5.42.



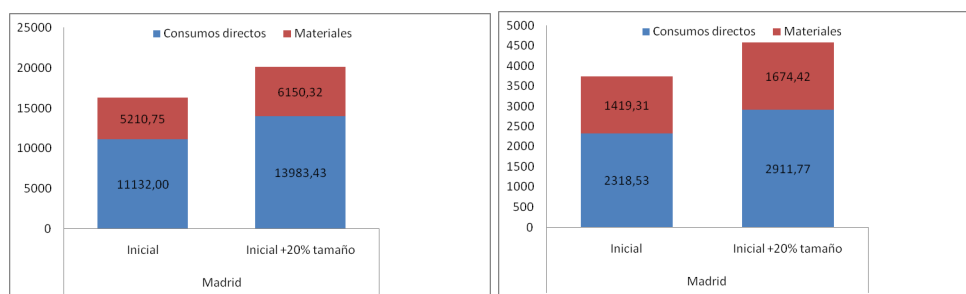


Figura 5.42. Consumo de energía primaria en kWh/año (izqda.) y emisiones equivalentes en kg CO<sub>2</sub>/año (dcha.) para la vivienda unifamiliar inicial y con un 20% más de superficie en Madrid

En el bloque de viviendas, se obtienen resultados similares. Además, en ambos modelos, se estima un sobrecoste del 17% por la mayor cantidad necesaria de materiales, a lo que habría que sumar un sobrecoste aproximado del 25% en la factura energética de las viviendas.

Los resultados anteriores deberían permitir abrir una reflexión sobre cuál es realmente el espacio que necesita una persona para poder vivir dentro de una vivienda. Una gran parte de la sociedad española considera que una vivienda de 30 m<sup>2</sup> para una persona no es un tamaño que garantice el cumplimiento de unas condiciones adecuadas de habitabilidad. Sin entrar a debatir en la cifra concreta que sería necesaria, parece claro que los edificios analizados presentan un potencial de reducción en su superficie útil, sin que ello afecte a la calidad de vida de los usuarios.

En cualquier caso, para garantizar la aplicabilidad y puesta en marcha de estas medidas en obra nueva sería necesario realizar una importante campaña de difusión y concienciación dirigida a todos los agentes del sector de la edificación, que incluya tanto a los diseñadores como a los usuarios finales de los edificios.

### 5.2.7. Disminución de las necesidades de transporte de los materiales de construcción

Tal como se demostró en los capítulos 3 y 4, el impacto del transporte en el ciclo de vida de un edificio puede ser significativo dependiendo de los materiales de construcción empleados y de las materias primas que los componen, así como de la distancia entre los proveedores de materiales y la ubicación del edificio.

Centrándonos en la vivienda unifamiliar, sin considerar las ubicaciones de anteriores apartados, con objeto de poder obtener valores promedio válidos a nivel nacional, se concluye que el 83% del transporte de materias primas necesarias para la fabricación en planta de los materiales de construcción se realiza por vía marítima, el 12% mediante ferrocarril y el 5% por carretera. Sin embargo, analizando el impacto energético, el transporte marítimo representa el 70% del impacto total, seguido del transporte por carretera con un 20% y del transporte por ferrocarril con un 10%, debido al diferente impacto específico por tonelada\*kilómetro de dichos medios de transporte. Las conclusiones son similares en los dos modelos de edificios analizados, tal como muestran las siguientes gráficas.

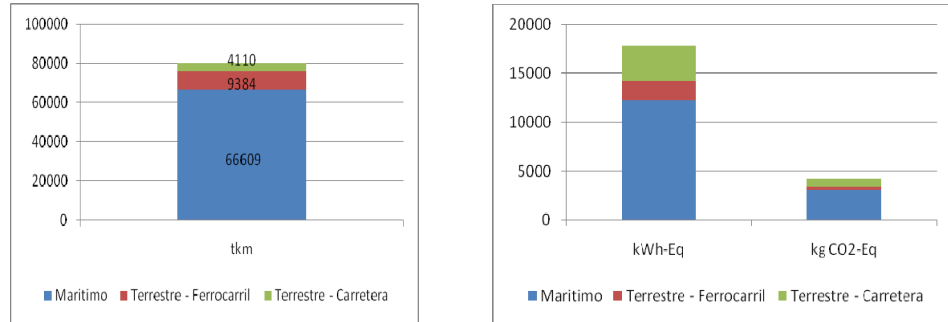


Figura 5.43. Transporte de materias primas de los materiales de construcción de la vivienda unifamiliar (izqda.) y su impacto del ciclo de vida en energía primaria y potencial de calentamiento global (dcha.)

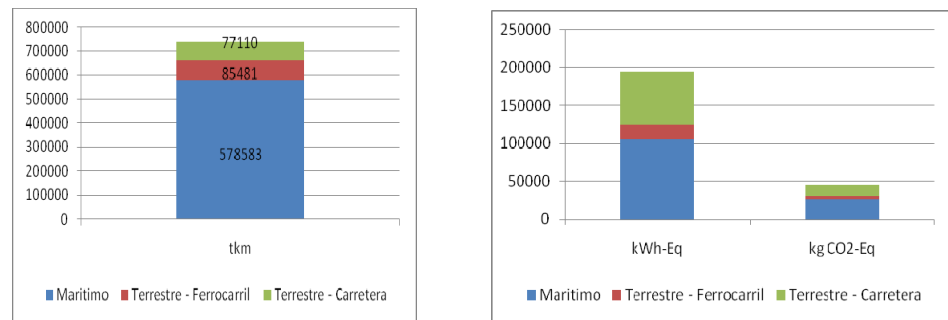


Figura 5.44. Transporte de materias primas de los materiales de construcción del bloque de viviendas (izqda.) y su impacto del ciclo de vida en energía primaria y potencial de calentamiento global (dcha.)

Por otra parte, el transporte de los materiales de construcción de planta al edificio y del edificio al punto de disposición final se realiza principalmente por carretera. A efectos de cálculo, se consideran unas distancias de 100 y 20 km respectivamente.

La Tabla 5.11 presenta el impacto de las distintas etapas de transporte incluidas en el ciclo de vida de los modelos de edificios analizados. Como se puede observar, a pesar de que la etapa de transporte de materias primas conlleva un mayor número de toneladas\*kilómetro, al realizarse principalmente por vía marítima su impacto es inferior a la etapa de transporte de planta a obra. Para el caso de la vivienda unifamiliar, se concluye que la repercusión del transporte sobre el impacto total de los materiales es del 18,9% en el caso de la energía primaria y del 15,4% en el caso de las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub>.

	Vivienda unifamiliar			Bloque de viviendas		
	Transporte (tkm)	Energía primaria (kWh-Eq)	Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)	Transporte (tkm)	Energía primaria (kWh-Eq)	Potencial de calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> -Eq)
Transporte Materias Primas	80.103,03	17.897,69	4.250,40	741.175,00	193.853,61	45.071,69
Transporte Planta-Edificio	28.838,13	26.159,37	5.569,26	358.103,69	324.839,61	69.157,43
Transporte Edificio-Disposición final	5.767,63	5.231,87	1.113,85	71.620,74	64.967,92	13.831,49
TOTAL Transporte	114.708,79	49.288,93	10.933,51	1.170.899,43	583.661,15	128.060,61
TOTAL Materiales		260.537,55	70.965,52		6.435.479,67	1.819.286,70

Tabla 5.11. Impacto global del transporte de los materiales de construcción en los modelos de edificios analizados

Para reducir el impacto energético y ambiental se propone una utilización de materiales de construcción locales, originarios de las zonas próximas a los edificios. Ello supondría una reducción significativa de la distancia del transporte, además de una vuelta a la forma en la que tradicionalmente se ha construido a lo largo de los siglos.

Si se consiguiera reducir en un 50% las distancias recorridas en las distintas etapas de transporte del ciclo de vida, en la vivienda unifamiliar se obtendría un ahorro en energía primaria de 24,6 MWh (lo que supone el 9,4% de la energía primaria total incorporada en los materiales), evitando la emisión de 5,5 tCO<sub>2</sub>-Eq (que representa el 7,7% de la huella de carbono total de los materiales), cifras que en el caso del bloque de viviendas serían de 291,8 MWh y 64 tCO<sub>2</sub>-Eq.

### 5.2.8. Disminución y mejora de la movilidad urbana

Tal como se demostró en el capítulo 4, el uso abusivo del vehículo privado con muy baja ocupación en detrimento de otros medios de transporte más ecoeficientes hace que el consumo asociado a la movilidad tenga una fuerte repercusión en los impactos energéticos y medioambientales de la edificación.

Tal como se indica en la “*Estrategia Española de Sostenibilidad Urbana y Local (EESUL)*”, la expansión del patrón de urbanización dispersa conlleva una fuerte segregación espacial de los edificios residenciales y una baja densidad, que dificulta la implantación de actividades urbanas como el comercio de proximidad, así como de las redes de transporte público, por su falta de rentabilidad. De hecho en numerosas ocasiones, las nuevas urbanizaciones sólo son accesibles mediante vehículo privado. Todo ello incrementa notablemente la demanda de movilidad entre la vivienda, los lugares de empleo, los servicios de educación y sanidad, y los centros comerciales y de ocio, que es respondida mayoritariamente mediante el vehículo privado. Además, según datos de la Agencia de Ecología Urbana de Barcelona, la demanda de espacio necesario para la circulación y el aparcamiento del automóvil privado alcanza en los nuevos desarrollos urbanos, porcentajes de hasta al 50%, en detrimento de otros usos y funciones urbanas.

En grandes municipios, la movilidad tiene lugar principalmente dentro del ámbito urbano como consecuencia de los desplazamientos diarios a los lugares de trabajo, mientras que en pequeños municipios y zonas rurales los desplazamientos son principalmente interurbanos hacia las zonas de trabajo de los alrededores y las zonas de ocio de los grandes centros urbanos. (Aranda A., Zabalza I., Scarpellini S., 2005).

Las crecientes necesidades de movilidad hacen que la población necesite cada vez más tiempo y dinero para desplazarse, sacrificando tiempo de descanso, de ocio o de trabajo remunerado. Esta circunstancia conlleva también una desigualdad social, ya que aquellos que tienen menores recursos económicos son los que normalmente se desplazan en condiciones más incómodas y empleando mayores tiempos. (Lizárraga C., 2006)

Si bien es cierto que durante los últimos años se han producido mejoras en la eficiencia energética de los vehículos, este hecho se ha visto compensado ampliamente por el aumento de la movilidad y el fuerte aumento de la motorización en los últimos diez años, superando ya en numerosas ciudades y áreas rurales los 500 automóviles por cada 1.000 habitantes, con una acusada tendencia

social hacia la adquisición de vehículos de mayor potencia, dando lugar a un acusado efecto rebote. A esto hay que añadir que el transporte público presenta en algunos municipios algunas deficiencias como son frecuencia irregular, antigüedad de la flota, falta de información sobre horarios y recorridos, etc. (Zabalza I., Valero A., 2003).

La Figura 5.45 presenta una comparativa de los impactos en energía primaria y emisiones del ciclo de vida de distintos medios de transporte, según la base de datos Ecoinvent v2.0 adaptada al mix eléctrico español, y considerando una unidad funcional de 1 persona\*km. A la hora de evaluar el impacto se considera el desplazamiento en cada medio, así como la producción, mantenimiento y disposición final de tanto de los vehículos, como de las infraestructuras necesarias.

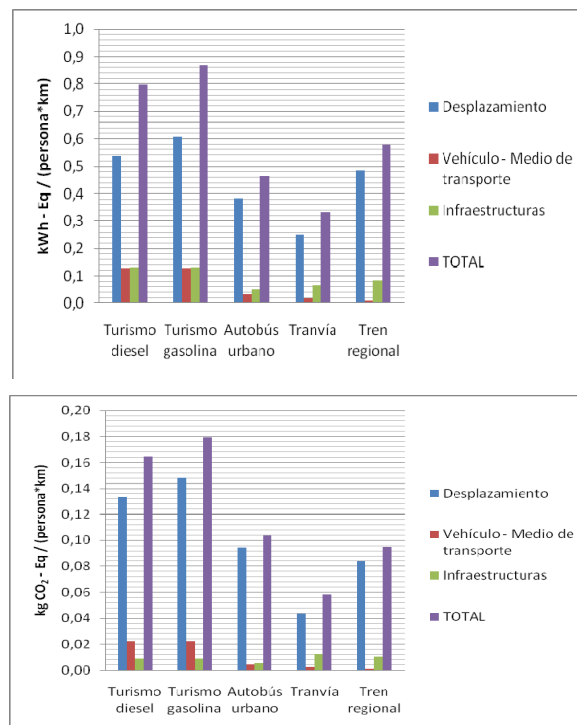


Figura 5.45. Demanda de energía primaria acumulada (arriba) y emisiones equivalentes de  $CO_2$  (abajo) en el ciclo de vida de distintos medios de transporte urbano

En todos los casos, el impacto asociado al consumo de combustible es mayoritario representando entre el 67% y el 91% de los impactos. En términos globales, el mayor impacto corresponde al vehículo privado de gasolina, seguido muy de cerca del vehículo diesel. Los medios de transporte público conllevan una disminución en los impactos totales del 50% aproximadamente, presentando algunas diferencias entre ellos. Así, el tranvía resulta el medio más ecoeficiente, ya que el mayor impacto asociado a su infraestructura en comparación con el autobús urbano, se ve ampliamente compensado por el menor impacto asociado a su funcionamiento, al consumir electricidad en vez de gasóleo. Por el contrario, el tren regional, debido a sus mayores necesidades de infraestructura y al mayor consumo eléctrico, presenta unos impactos ligeramente superiores a los otros medios de transporte público.

Seguidamente se cuantifica el impacto de la movilidad asociado a un hogar constituido por 4 personas. A efectos de comparar dicho impacto con los impactos asociados a los materiales de construcción y al consumo energético durante el uso de la vivienda se ha considerado el modelo de vivienda unifamiliar de Madrid. Para

evaluar la movilidad se considera el desplazamiento en vehículo diesel entre la vivienda, el trabajo y los centros comerciales y de ocio, para un conjunto de posibles distancias recorridas por trayecto, estimadas en 1, 2, 5, 15, 30 y 60 kilómetros. Para el desplazamiento al trabajo se considera el uso de 2 vehículos por vivienda a razón de 4 trayectos diarios, excepto para trayectos superiores a 15 km, en cuyo caso, se consideran 2 trayectos/día. Se supone asimismo que el posible desplazamiento de niños en edad escolar se incorpora dentro de los trayectos anteriores. Por otra parte, para el desplazamiento a los centros comerciales y de ocio se considera el uso de 1 vehículo por vivienda, y un total de 4 trayectos semanales.

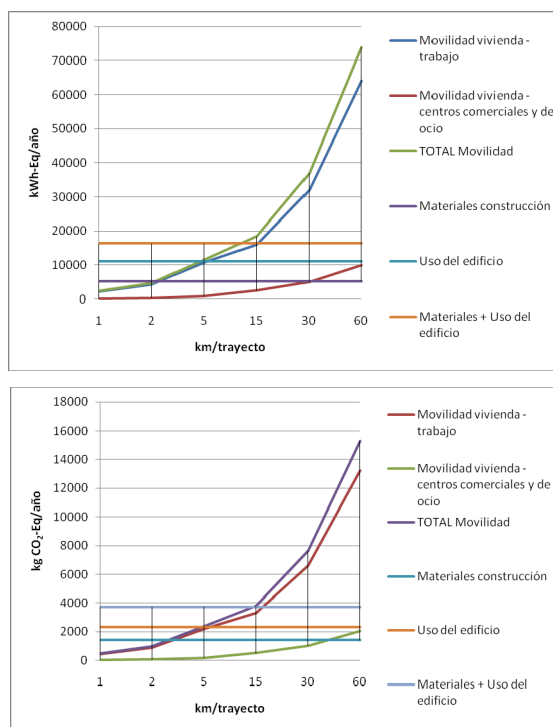


Figura 5.46. Demanda anual de energía primaria acumulada (arriba) y emisiones anuales equivalentes de CO<sub>2</sub> (abajo) en el ciclo de vida de la vivienda unifamiliar en Madrid

A partir de las consideraciones anteriores, tal como muestra la Figura 5.46, en la vivienda unifamiliar analizada, el impacto asociado a la movilidad supera el 50% del impacto total del ciclo de vida de la vivienda, a partir de un desplazamiento promedio superior a 30 km/día en 2 vehículos. Conviene reseñar que en el cálculo anterior no se han evaluado los posibles desplazamientos durante los fines de semana a segundas viviendas ni los desplazamientos durante los periodos de vacaciones, ya que se pretende centrar el análisis en la movilidad urbana. Para reducir dicho impacto existen varias soluciones. En su evaluación no se van a hacer distinciones entre las localidades analizadas, como se ha hecho en los apartados precedentes, sino que directamente se obtendrán unos valores promedios a nivel nacional para un hogar constituido por 4 personas.

En primer lugar, la compartición del vehículo privado (*car pooling*) o alquilado (*car sharing*), práctica que está dando sus primeros pasos especialmente en las grandes ciudades, permite obtener ahorros significativos en los consumos de energía final, siempre que los pasajeros sigan trayectos similares. En el ejemplo anterior, evitar el uso de 2 vehículos para pasar a utilizar un solo vehículo compartido con otra vivienda, permitiría reducir el impacto de la movilidad en un

65% aproximadamente, evitando la emisión anual de casi 2,5 toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub>, y generando un ahorro en energía primaria de 12 MWh/año.

Por otra parte, el transporte público, con un impacto un 50% inferior al de los medios privados, es fundamental para garantizar una movilidad sostenible en cualquier municipio de un cierto tamaño. Volviendo al anterior ejemplo, sustituyendo el uso de los vehículos privados por el transporte público, para unas necesidades de movilidad de 30 km/día a los lugares de trabajo y 60 km/semana a los centros comerciales y de ocio, los impactos se reducen hasta en un 72%, dejando de emitir 2,7 t CO<sub>2</sub>-Eq/año y ahorrando 13,2 MWh/año en energía primaria.

Finalmente, el retorno al tradicional diseño compacto y multifuncional de las urbanizaciones, favoreciendo el comercio de proximidad, permitiría reducir las necesidades de movilidad hasta en un 90%, propiciando además el desplazamiento a pie o en bicicleta. En el ejemplo anterior, al eliminar la movilidad (cuantificada en 60 km/semana) hacia las zonas comerciales y de ocio, que en un modelo compacto quedarían integradas dentro de la propia urbanización, y reducir el trayecto promedio a los lugares de trabajo de 30 a 5 km/día utilizando como mucho un solo vehículo, se obtendría un ahorro de 17,4 MWh/año en energía primaria, y se evitaría la emisión de 3,6 t CO<sub>2</sub>-Eq/año.

Para poder aplicar de un modo efectivo todas las medidas anteriores, conducentes a la reducción de la movilidad y del uso del vehículo privado en los desplazamientos, se requiere la puesta en marcha de campañas divulgativas y otro tipo de iniciativas o medidas de disuasión con objeto de sensibilizar a la población y fomentar alternativas de movilidad urbana más ecoeficientes.

### **5.3.Extrapolación de resultados al sector de la edificación residencial en España. Curvas ahorro - inversión**

---

En este apartado se hace una extrapolación de los resultados anteriores al conjunto del parque edificatorio residencial en España, con objeto de evaluar a nivel nacional el potencial de ahorro energético y de disminución de emisiones en la edificación residencial, frente a la inversión necesaria.

Para ello, inicialmente y a modo de resumen, se recopila para cada una de las medidas propuestas en el apartado anterior, el ahorro de energía final obtenido en la etapa de uso del edificio, así como la disminución de la energía primaria y de emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> que se producirían en todo el ciclo de vida del edificio. Asimismo se hace una valoración aproximada de la inversión necesaria para su puesta en marcha.

En este sentido, conviene destacar que la aplicación de muchas de las medidas propuestas no conlleva una inversión adicional a pagar por parte del usuario de la vivienda. Sin embargo la consideración de las mismas por parte de los planificadores urbanísticos y diseñadores de los edificios requiere el desarrollo de importante campaña divulgativa específicamente dirigida a estos agentes para dar a conocer y promover la aplicación de dichas medidas.

La inversión económica estimada a nivel nacional sería de 8 millones de euros por cada año en que se mantenga la campaña. No obstante, y con objeto de no incrementar el gasto público de la Administración, esta campaña podría ponerse en marcha dentro de la “Actuaciones de Formación y Divulgación en Materia de

Ahorro y Eficiencia Energética” que cada Comunidad Autónoma viene desarrollando dentro del Plan de Acción 2008-2012 de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España. De hecho, uno de los sectores en los que se enfocan dichas actuaciones es precisamente el sector de la edificación, por lo que las sinergias existentes son más que evidentes, pudiéndose aprovechar tanto las jornadas técnicas informativas como los cursos específicos de formación y los cursos de formación de formadores (actualmente concebidos únicamente para dar a conocer la normativa edificatoria vigente) para explicar y fomentar las medidas aquí propuestas.

Las siguientes tablas cuantifican el ahorro e inversión para los dos modelos de edificación residencial considerados. Los valores negativos relativos a la disminución de la demanda de energía primaria, suponen, según la metodología aplicada (demanda de energía acumulada-CED), un aumento de la energía primaria total, si bien el efecto puede considerarse positivo, ya que en todos los casos disminuye la fracción no-renovable, aumentando la fracción renovable de dicha demanda.

Medida	Ahorro de energía final (kWh/m <sup>2</sup> año)			Disminución de la demanda de energía primaria acumulada (kWh-Eg/m <sup>2</sup> año)			Disminución de las emisiones equivalentes de CO <sub>2</sub> -Eg/m <sup>2</sup> año)			Inversión total (€/edificio)
	Madrid	Burgos	Sevilla	Madrid	Burgos	Sevilla	Madrid	Burgos	Sevilla	Valor medio
Orientación correcta de la fachada principal del edificio	8,60	4,20	10,10	16,09	5,17	22,27	3,15	1,15	4,18	Nula (campana divulgativa)
Elección adecuada de las tasas de ventilación	15,00	20,90	8,50	20,42	25,71	12,03	4,40	5,74	2,56	3.000
Sustitución de caldera convencional por caldera de condensación	7,00	11,27	2,10	8,60	13,83	2,57	1,92	3,09	0,57	500
Sustitución de caldera convencional por caldera de biomasa	-34,00	-53,32	-10,40	48,91	79,49	16,27	11,88	19,28	3,94	3.800
Instalación de captadores solares térmicos para ACS	10,90	5,79	12,00	12,75	6,77	14,04	2,88	1,53	3,17	3.000
Instalación de paneles fotovoltaicos conectados a la red	9,80	5,00	17,60	18,13	9,25	32,56	4,94	2,52	8,87	2.500 - 6.800
Sustitución del enfriamiento convencional por enfriamiento evaporativo	3,57	-	9,48	11,43	-	30,33	1,99	-	5,27	200
Adecuación del marco y vidrio de las ventanas	16,10	27,70	6,60	17,35	34,18	8,03	4,18	7,73	1,91	700
Eliminación de parkings subterráneos en los edificios	-	-	-	12,19			3,53			Nula (campana divulgativa)
Adosado de los edificios	41,80	42,20	22,50	54,39	53,73	32,82	11,93	12,05	6,94	
Elección del espesor de aislamiento convencional óptimo:										
Escenario 1 – sin aislar	53,80	92,07	25,90	59,06	102,58	29,28	12,90	22,64	6,22	6.000-11.500
Escenario 2 – aislante mínimo	18,80	19,97	6,00	16,41	16,61	4,61	3,53	3,52	0,91	3.000-7.700

Medida	Ahorro de energía final (kWh/m <sup>2</sup> año)			Disminución de la demanda de energía primaria acumulada (kWh-Eq/m <sup>2</sup> año)			Disminución de las emisiones equivalentes de CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> -Eq/m <sup>2</sup> año)			Inversión total (€/edificio)
	Madrid	Burgos	Sevilla	Madrid	Burgos	Sevilla	Madrid	Burgos	Sevilla	Valor medio
Sustitución de aislamiento convencional por aislamiento natural: - Corcho - Fibra de celulosa	-	-	-	-1,61	-2,47	-1,61	0,60	0,93	0,60	1.200 - 2.000
	-	-	-	1,47	2,26	1,47	0,41	0,63	0,41	1.150-1.900
Sustitución de ladrillos exteriores convencionales por bloques cerámicos de arcilla aligerada	-	-	-	-0,02			3,28			Obra nueva: Nula (campana divulgativa) Rehabilitación: 15.000€
Sustitución de cubiertas convencionales por cubiertas vegetales	1,21	1,01	1,51	3,19	1,81	5,62	0,95	0,73	1,34	Obra nueva: Nula (campana divulgativa) Rehabilitación: 4.700€
Utilización de materiales de construcción a base de clinker de menor impacto	-	-	-	10,8			1,09			Nula (campana divulgativa)
Adecuación de la forma y tamaño del edificio	14,55	20,27	7,84	28,74	33,87	23,82	6,37	7,69	5,00	
Disminución de las necesidades de transporte de los materiales de construcción	-	-	-	4,58			1,02			
Disminución y mejora de la movilidad urbana: ciudad compacta	-	-	-	161,88			33,00			

Tabla 5.12. Potencial de disminución de impactos energéticos y ambientales en viviendas unifamiliares

Medida	Ahorro de energía final (kWh/m <sup>2</sup> año)			Disminución de la demanda de energía primaria acumulada (kWh-Eq/m <sup>2</sup> año)			Disminución de las emisiones equivalentes de CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> -Eq/m <sup>2</sup> año)			Inversión total (€/edificio)
	Madrid	Burgos	Sevilla	Madrid	Burgos	Sevilla	Madrid	Burgos	Sevilla	Valor medio
Orientación correcta de la fachada principal del edificio	5,30	3,40	9,40	10,07	4,18	18,06	1,96	0,93	3,51	Nula (campana divulgativa)
Elección adecuada de las tasas de ventilación	15,50	22,00	9,00	19,46	27,06	12,84	4,31	6,04	2,73	25.000
Sustitución de caldera convencional por caldera de condensación	7,70	14,20	3,60	7,84	17,36	4,39	1,88	3,88	0,98	3.000
Sustitución de caldera convencional por caldera de biomasa	-12,70	-21,60	-4,80	60,48	103,25	24,67	14,31	24,42	5,83	30.000
Instalación de captadores solares térmicos para ACS	12,45	6,60	13,77	14,57	7,72	16,11	3,28	1,74	3,63	12.600-27.600
Instalación de paneles fotovoltaicos conectados a la red	8,70	4,70	16,00	16,10	8,69	29,60	4,38	2,37	8,06	61.500-164.500
Automatización y facturación individualizada de las instalaciones de calefacción central	11,64	19,62	4,22	14,32	24,13	5,19	3,20	5,39	1,16	12.000
Sustitución del enfriamiento convencional por enfriamiento evaporativo	2,77	-	8,16	8,86	-	26,12	1,54	-	4,54	6.000



Medida	Ahorro de energía final (kWh/m <sup>2</sup> año)			Disminución de la demanda de energía primaria acumulada (kWh-Eq/m <sup>2</sup> año)			Disminución de las emisiones equivalentes de CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> -Eq/m <sup>2</sup> año)			Inversión total (€/edificio)
	Madrid	Burgos	Sevilla	Madrid	Burgos	Sevilla	Madrid	Burgos	Sevilla	Valor medio
Adecuación del marco y vidrio de las ventanas	24,10	34,53	9,60	26,60	42,58	12,31	6,05	9,60	2,81	17.000
Eliminación de parkings subterráneos en los edificios	-	-	-	4,07			1,23			Nula (campana divulgativa)
Adosado de los edificios	3,90	4,70	1,90	4,80	5,78	2,73	1,07	1,29	0,58	
Elección del espesor de aislamiento convencional óptimo: Escenario 1 – sin aislar Escenario 2 – aislante mínimo	62,56	95,20	27,88	66,36	103,10	32,00	14,45	22,72	6,74	78.000-150.000
	19,1	28	8,2	18,9	21,1	7,02	3,96	4,62	1,39	33.000-42.000
Sustitución de aislamiento convencional por aislamiento natural: - Corcho - Fibra de celulosa	-	-	-	-1,42	-1,56	-1,20	0,55	0,61	0,47	12.900-16.200
	-	-	-	1,32	1,48	1,15	0,38	0,43	0,33	12.100-15.200
Sustitución de ladrillos exteriores convencionales por bloques cerámicos de arcilla aligerada	-	-	-	-0,14	-0,13	-0,36	1,98	1,99	1,92	Obra nueva: Nula (campana divulgativa) Rehabilitación: 250.000€
Sustitución de cubiertas convencionales por cubiertas vegetales	0,83	0,78	1,02	1,72	0,97	3,46	0,42	0,31	0,70	Obra nueva: Nula (campana divulgativa) Rehabilitación: 52.000€
Utilización de materiales de construcción a base de clínker de menor impacto	-	-	-	10,85			1,14			Nula (campana divulgativa)
Adecuación de la forma y tamaño del edificio	15,88	24,84	9,02	29,23	38,55	23,88	6,59	8,81	5,15	
Disminución de las necesidades de transporte de los materiales de construcción	-	-	-	1,95			0,43			
Disminución y mejora de la movilidad urbana: ciudad compacta	-	-	-	232,24			47,34			

Tabla 5.13. Potencial de disminución de impactos energéticos y ambientales en bloques de viviendas

### 5.3.1. Modelización de las curvas de ahorro-inversión

A partir de la cuantificación de las medidas de mejora propuestas en el apartado anterior, se puede obtener un modelo del impacto energético y ambiental del sector de la edificación residencial en España por medio de la caracterización de las curvas ahorro –inversión (Valero A., 1982) del sector.

Conviene remarcar que el modelo obtenido supone una aproximación, que permite visualizar tendencias y obtener unos órdenes de magnitud que, puedan utilizarse, en cualquier caso, para una adecuada toma de decisiones. Evidentemente la obtención de un modelo más preciso conllevaría la ampliación del análisis realizado en este capítulo, considerando otras climatologías y otros modelos de

edificios que incluyan otro tipo de geometrías. A continuación se presentan las curvas Ahorro - Inversión obtenidas.

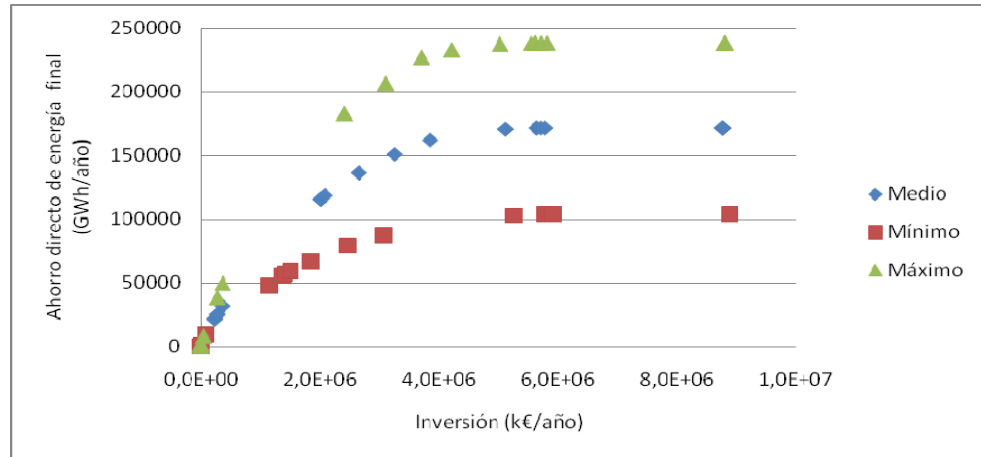


Figura 5.47. Curva ahorro directo de energía final en la etapa de uso del edificio – inversión

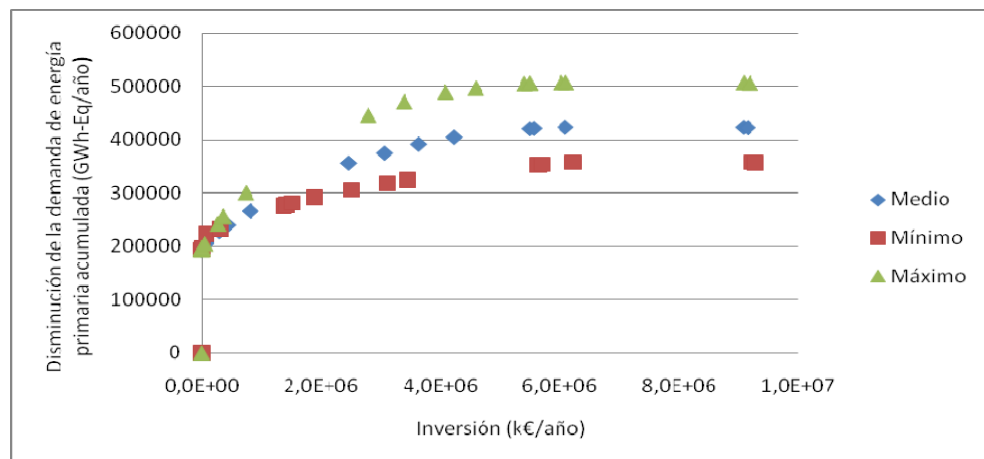


Figura 5.48. Curva disminución de demanda de energía primaria acumulada – inversión

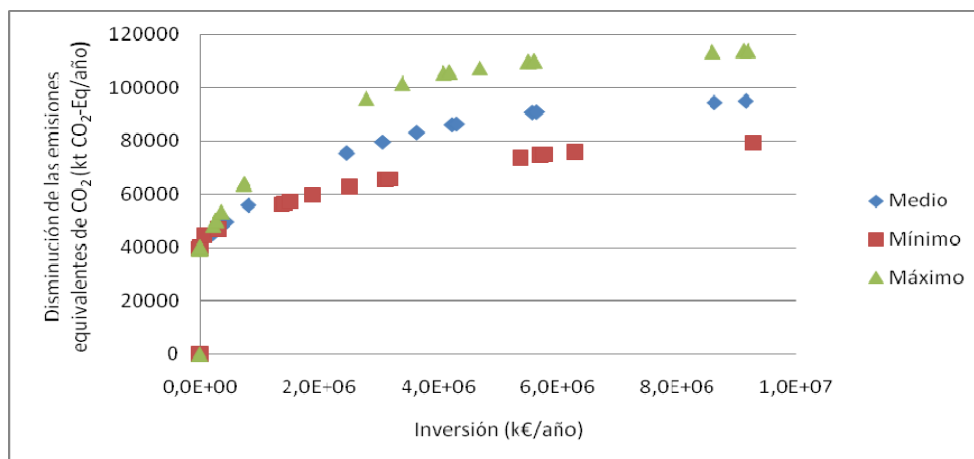


Figura 5.49. Curva disminución de emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> acumuladas – inversión

Conviene destacar que el ajuste exponencial aproxima bastante bien el ahorro directo de energía final frente a la inversión, produciéndose un mayor error al ajustar la disminución de energía primaria y emisiones de CO<sub>2</sub>. Esto es debido a la existencia de numerosas medidas con un altísimo potencial de ahorro, cuya inversión es prácticamente nula, lo que produce cierta distorsión en el ajuste.

	Ahorro Máximo anual: A <sub>M</sub>		Coeficiente Saturación: $\epsilon$	
Ahorro de energía final	Mínimo:	105.153 GWh/año	Mínimo:	5,54 E-07 (k€/año) <sup>-1</sup>
	Medio:	174.258 GWh/año	Medio:	5,70 E-07 (k€/año) <sup>-1</sup>
	Máximo:	238.035 GWh/año	Máximo:	6,48 E-07 (k€/año) <sup>-1</sup>
Disminución de demanda de energía primaria acumulada	Mínimo:	356.500 GWh-Eq/año	Mínimo:	2,00 E-06 (k€/año) <sup>-1</sup>
	Medio:	423.500 GWh-Eq/año	Medio:	2,49 E-06 (k€/año) <sup>-1</sup>
	Máximo:	505.600 GWh-Eq/año	Máximo:	2,17 E-06 (k€/año) <sup>-1</sup>
Disminución de emisiones equivalentes de CO <sub>2</sub> acumuladas	Mínimo:	80.000 kt CO <sub>2</sub> -Eq/año	Mínimo:	1,60 E-06 (k€/año) <sup>-1</sup>
	Medio:	95.500 kt CO <sub>2</sub> -Eq/año	Medio:	2,20 E-06 (k€/año) <sup>-1</sup>
	Máximo:	115.000 kt CO <sub>2</sub> -Eq/año	Máximo:	1,75 E-06 (k€/año) <sup>-1</sup>

Tabla 5.14. Modelado de las curvas Ahorro - Inversión

La idoneidad de las medidas propuestas en este capítulo queda patente al compararlas con los resultados previstos en el actual Plan de Acción 2008-2012 de la E4 para el sector de la edificación. Por término medio, el máximo ahorro directo en energía final obtenido al extrapolar las medidas propuestas al conjunto del parque edificatorio residencial es más de 7 veces mayor al contemplado en dicho Plan de Acción, mientras que la inversión máxima necesaria tan solo se multiplica por algo menos de 3. Además, la disminución de impactos es todavía mayor al considerar también los ahorros indirectos. Así, la disminución máxima en las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> acumuladas (directas e indirectas) es del orden de 11 veces mayor a la disminución en las emisiones directas de CO<sub>2</sub> contemplada en el Plan de Acción.

Igualmente, si el mismo presupuesto del Plan de Acción (que asciende a casi 3.400 M€ para el sector de la edificación) se invirtiese en promover las medidas

propuestas en este capítulo, el ahorro en energía final sería 6,8 veces mayor, siendo la disminución de emisiones 9,4 veces mayor.

En las curvas anteriores, las medidas propuestas han sido ordenadas según su ratio de ahorro anual / inversión anualizada según la vida útil de la inversión, como referente del nivel de viabilidad de cada medida. La suma acumulada de ahorro e inversiones es la que ha permitido obtener las curvas ahorro-inversión de tipo exponencial. Por tanto, este criterio de ordenación de las medidas permite definir de un modo objetivo una estrategia de ecoeficiencia en el sector analizado, en este caso el de la edificación residencial.

Seguidamente se hace un análisis de sensibilidad de la curva “Medio” de la Figura 5.49, que representa la disminución promedio de emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> acumuladas frente a la inversión necesaria.

En la Figura 5.50 se muestran los valores de disminución anual de emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> en función de la inversión anualizada necesaria (para la curva “Medio” de la Figura 5.49) correspondientes a las 19 medidas de ecoeficiencia propuestas, ordenadas de mayor a menor ratio: disminución anual de emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> / inversión anualizada.

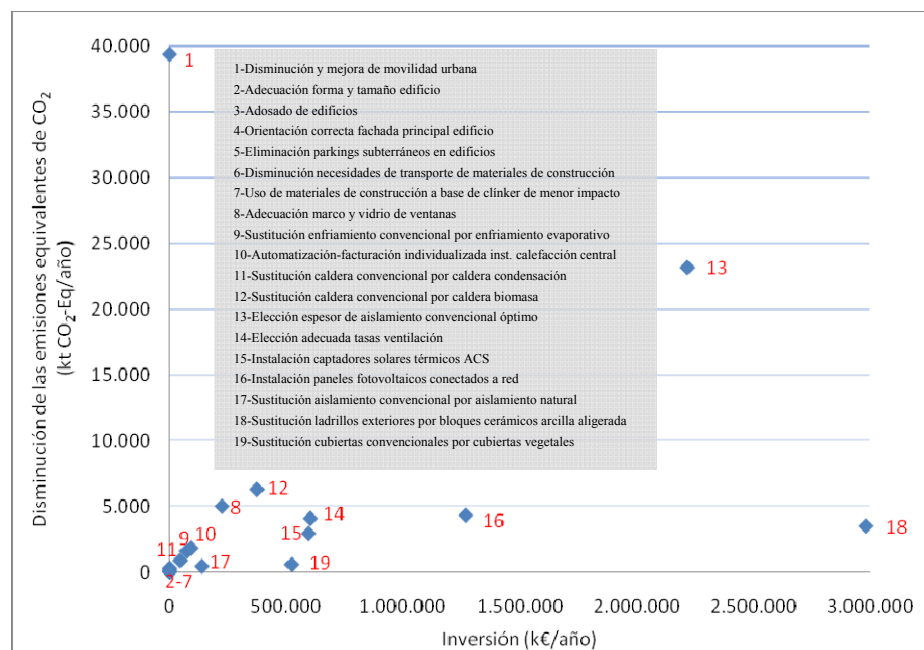


Figura 5.50. Ordenación de las medidas para la disminución de emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub>

La implementación conjunta de las medidas 1 a 12 (ambas inclusive), conllevaría una reducción total de emisiones de casi 56.000 ktCO<sub>2</sub>-Eq/año con una inversión asociada de casi 820.000 k€/año, lo que supondría un coste inferior a 15€ por tonelada de CO<sub>2</sub> evitada, que se elevaría a más de 38 € por tonelada al implementar la medida nº 13, y a más de 96 € por tonelada al implementar las 19 medidas enunciadas, tal como se muestra en la Figura 5.51.

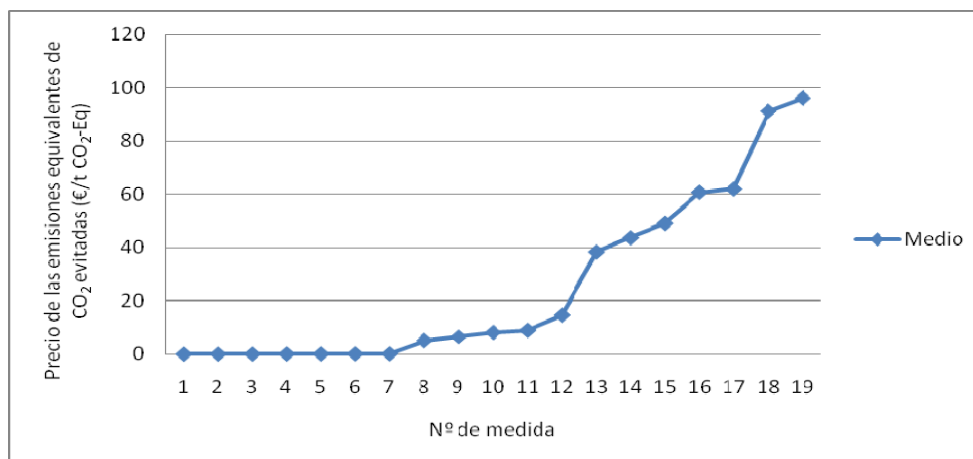


Figura 5.51. Evolución del coste de las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> evitadas para la curva “Medio” en función de las medidas implementadas

No obstante, esta cifra es casi 4 veces más pequeña que el coste de las emisiones evitadas en el Plan de Acción mencionado anteriormente, que asciende a 379 € por tonelada de CO<sub>2</sub> evitada.

En la Figura 5.50 se aprecia el carácter fuertemente disruptivo de la medida nº1, que corresponde a la disminución y mejora de la movilidad urbana. La puesta en marcha de esta medida (cuyas acciones más representativas se expusieron detalladamente en el apartado 5.2.8) permite obtener una disminución de emisiones casi 8 veces superior al valor promedio de disminución de emisiones de las 19 medidas, y 1,7 veces superior a la medida nº 13 que corresponde a la optimización del aislamiento en los edificios, que sería la segunda medida en cuanto a disminución de emisiones asociada.

Por tanto, el valor máximo obtenido en el modelo de curva “Medio” presenta una gran sensibilidad hacia las medidas nº1 y nº13. De hecho, en caso de no considerar la medida nº1, la disminución máxima de emisiones bajaría más del 40%, tal como puede comprobarse en la Figura 5.52. Si además se excluye también la medida nº13, dicha disminución máxima bajaría en un 65%.

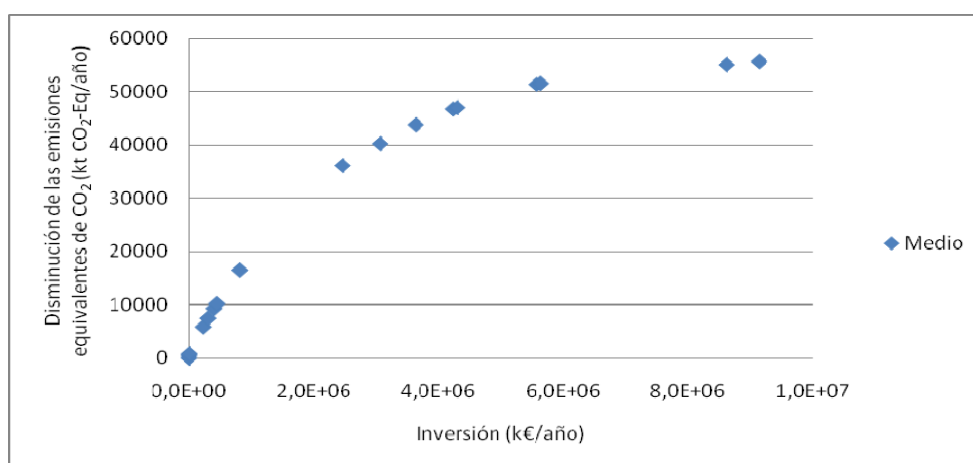


Figura 5.52. Curva “Medio” de disminución de emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> acumuladas – inversión eliminando la medida nº1

Pero además, la eliminación de la medida nº1 afectaría también a la elasticidad. Siguiendo con en el modelo de curva “Medio”, dicha eliminación supondría una bajada en la elasticidad del 84%. Esto significa que ante una variación en la inversión realizada, la variación obtenida en la disminución de emisiones sería menor, y por tanto, esta variable se haría más insensible a la variable inversión. Por ello, ante un incremento de la inversión, la disminución de emisiones conseguida sería menor.

Si bien el criterio de ordenación más adecuado es de mayor a menor ratio de disminución anual / inversión anualizada, en caso de que las Administraciones plantearán otro criterio de ordenación, los resultados obtenidos serían diferentes. Por ejemplo, si el criterio de ordenación fuese de mayor a menor disminución de emisiones, sin tener en cuenta la inversión de cada medida, el modelo de curva “Medio” obtenido sería el que muestra la Figura 5.53.

Como se puede observar, la medida nº1, que representa más del 40% de la disminución máxima no cambiaría, puesto que cuenta con la mayor ratio disminución anual / inversión anualizada, proporcionando al mismo tiempo la mayor disminución anual. Por ello, es de vital importancia priorizar siempre la aplicación de esta medida. En cualquier caso, este criterio de ordenación no es objetivamente adecuado, puesto que no permite optimizar los recursos económicos invertidos, ya que se priorizan medidas menos efectivas.

A modo de ejemplo, con este criterio, una inversión de 2.200.000 k€/año permitiría obtener una reducción de 62.500 kt CO<sub>2</sub>-Eq/año, frente a los 73.800 kt CO<sub>2</sub>-Eq/año (lo que supone un 18% más) que se obtendrían con esa misma inversión, en caso de haber optado como criterio de ordenación por la ratio disminución / inversión.

La diferencia entre ambos criterios sería todavía mayor en caso de que se eliminase la medida nº1. Entonces invirtiendo 2.200.000 k€/año se obtendría una reducción de 23.200 kt CO<sub>2</sub>-Eq/año con el criterio de máxima disminución, mientras que con el criterio de máxima ratio disminución/inversión, la reducción sería un 48% más elevada para el mismo nivel de inversión.

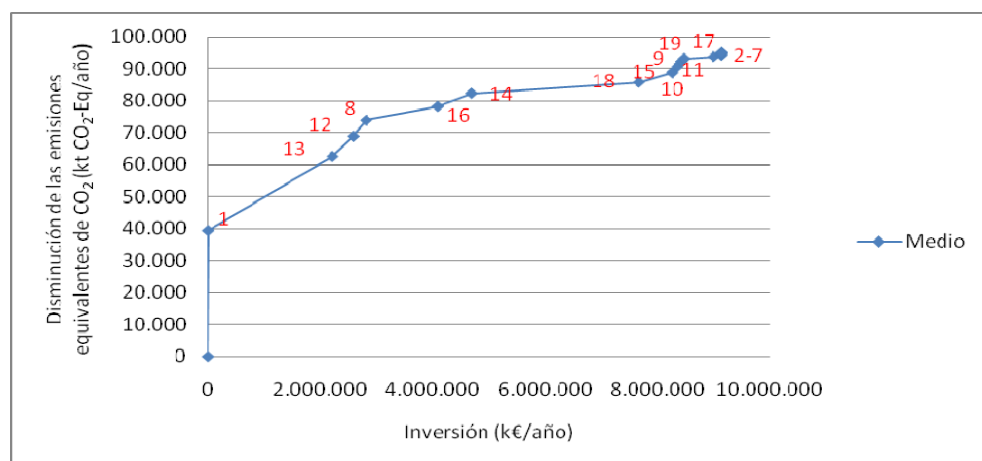


Figura 5.53. Curva “Medio” de disminución de emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> acumuladas – inversión, ordenadas de mayor a menor, en función de la disminución de emisiones obtenida

Otro criterio de ordenación planteable, sería de menor a mayor inversión, sin tener en cuenta la disminución de emisiones asociada a cada inversión. Según este criterio, el modelo de curva “Medio” obtenido sería el que muestra la Figura 5.54.

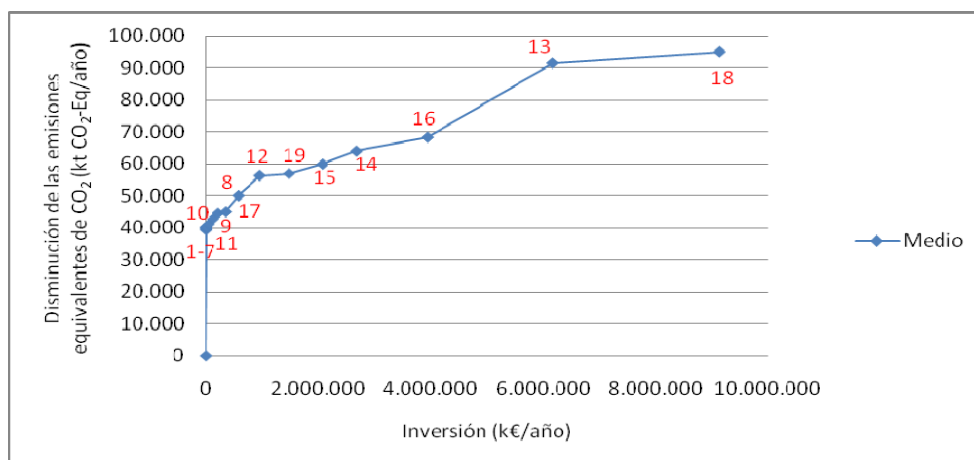


Figura 5.54. Curva “Medio” de disminución de emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> acumuladas – inversión, ordenadas de menor a mayor, en función de la inversión necesaria

Igualmente, este criterio de ordenación no resulta adecuado, ya que a pesar de que las 7 primeras medidas no se verían afectadas en su orden -ya que todas ellas proporcionan altos niveles de disminución con bajos niveles de inversión- para un nivel de inversión superior no se conseguiría optimizar los recursos económicos invertidos.

Por ejemplo, la priorización de las medidas nº19, 15, 14 y 16 frente a la medida nº13 conllevaría un sobrecoste de 774 M€/año (2.990 M€/año frente a 2.216 M€/año), y además la reducción de emisiones obtenida sería aproximadamente la mitad de la obtenida con la medida nº13 (11.987 kt CO<sub>2</sub>-Eq/año frente a 23.191 kt CO<sub>2</sub>-Eq/año).

Como conclusión cabe destacar la importancia que tiene el orden de implantación de las medidas propuestas en este capítulo para la edificación residencial. No obstante, la repercusión final del criterio de ordenación dependerá del nivel de ecoeficiencia inicial del sector analizado y de las posibilidades concretas de actuación existentes.

## 5.4. Conclusiones

---

Para conseguir una edificación sostenible es necesario volver a aplicar las estrategias propias de la arquitectura vernácula, basada en tradiciones constructivas ancestrales, adecuadas a la finalidad prevista, favoreciendo el aprovechamiento de microclimas y utilizando materiales disponibles en el entorno inmediato en ciclos cerrados sin impactos ambientales, que han sido implementadas a lo largo de la historia por los habitantes de una región determinada a partir del conocimiento empírico transmitido de una generación a otra y la propia experimentación.

Estas estrategias han sido olvidadas durante las últimas décadas, por lo que es preciso recuperarlas y darles un nuevo enfoque aprovechando los avances tecnológicos, para conseguir soluciones constructivas ecoeficientes, sin disminuir el nivel de confort de los usuarios de los edificios. Para conseguir dicho confort térmico, el diseño arquitectónico debe ser la pieza clave, por encima de la eficiencia de los sistemas y equipos energéticos activos. Por tanto, antes de pensar en disminuir los consumos de energía de los equipos hay que pensar en disminuir la demanda térmica (calefacción y refrigeración) del edificio que tendrá que ser cubierta posteriormente por dichos equipos, por debajo incluso de los límites establecidos por la normativa vigente.

Disminuir dicha demanda no es tarea sencilla, especialmente en climatologías en las que exista una cierta severidad climática tanto en invierno como en verano, ya que conlleva exigir al edificio un comportamiento distinto a lo largo de las distintas épocas del año. Así, durante los meses de invierno interesará que el edificio tenga unas pérdidas limitadas, promoviendo todo lo posible las ganancias solares aplicando técnicas activas (como los captadores para calentamientos de lechos de grava) y pasivas (como los muros Trombé o los invernaderos). Por el contrario, durante los meses de verano se deberían promover las pérdidas energéticas, aprovechando la ventilación cruzada y la humectación, y limitar las ganancias solares del edificio, mediante sistemas de protección solar adecuadamente dimensionados.

La disminución de la demanda térmica debe ser, por tanto, una prioridad del diseño arquitectónico mediante un buen diseño de la envolvente del edificio, analizando por medio de herramientas de simulación dinámica la proporción y localización más adecuada de la superficie acristalada, las protecciones solares, así como la orientación más favorable; y considerando además la selección de los materiales y soluciones constructivas más respetuosos con el medioambiente a lo largo del ciclo de vida completo del edificio.

La vivienda es nuestra tercera piel y, como tal, debe protegernos de los cambios meteorológicos bruscos que se produzcan en el exterior. Sin embargo, en la actualidad, esta necesaria protección se ha desvirtuado propiciando una cultura de interiores independiente de las condiciones climáticas externas que nos ha llevado a una pérdida de contacto con el entorno y los elementos naturales. Por ello, es necesario un nuevo acercamiento a la naturaleza, que convierta los edificios en organismos vivos habitables, propiciando una auténtica biomimesis y una arquitectura orgánica. Puesto que la vida no es algo inerte, sino dinámico que interactúa con su entorno; una edificación biomimética debe conllevar una adaptación armónica al clima, al lugar y a los usuarios.



Teniendo en cuenta lo anterior, no es posible proponer soluciones universales que proporcionen las mismas ventajas cuantitativas para cualquier función y ubicación del edificio. En un edificio, como en cualquier organismo vivo, puede haber múltiples soluciones. Sin embargo, sí que es posible establecer una serie de criterios generales y medidas concretas, tal como se ha hecho en este capítulo, que si bien ofrecerán unos niveles de ahorro y de mejora variables en función de la ubicación, serán válidos en todos los casos.

La correcta orientación de la fachada principal de los edificios debe ser uno de los criterios fundamentales de diseño, ya que condiciona su demanda térmica a lo largo de toda su vida útil, siendo imposible establecer modificaciones en la orientación hasta el momento de derribo del edificio. Evidentemente en nuestro hemisferio Norte, la orientación sur es la que conlleva menores consumos de climatización al recibir la máxima radiación solar en invierno evitando el sobrecalentamiento en verano, por lo que dicha orientación debería ser un requisito de obligado cumplimiento en cualquier edificio nuevo o a rehabilitar. Del mismo modo deberían impedirse las orientaciones este/oeste, especialmente en climatologías con elevada severidad climática de verano, ya que pueden provocar un aumento superior al 25% en los consumos finales de climatización, debido al fuerte sobrecalentamiento que se produce en las mismas durante los meses de verano.

Conjuntamente con la orientación del edificio debería considerarse también la vegetación en las inmediaciones del edificio ya que ejerce un importante papel protector de las distintas fachadas. De este modo, la colocación de árboles de hoja perenne en las fachadas norte-noroeste a modo de cortavientos constituye un elemento de protección frente a los vientos fríos, del mismo modo que los árboles de hoja caduca ubicados en las fachadas sur, este y oeste (especialmente en éstas dos últimas), bloquean el paso de la radiación solar durante los meses de verano, permitiendo su paso en la época más fría.

Por otra parte, una ventilación inadecuada del edificio conlleva un aumento de su demanda térmica. Tal como se ha demostrado en este capítulo, al multiplicar por cinco el número de renovaciones-hora del edificio, se duplica el consumo de energía final. No obstante, la normativa no debería poner el énfasis en el cumplimiento de un determinado número de renovaciones-hora más o menos adecuado, sino en establecer los periodos idóneos de ventilación a lo largo del año y a lo largo del día. En este sentido, se proponen dos alternativas: la primera, sería obligar a incorporar un sistema de control automático de la ventilación en función de la temperatura interior y exterior del edificio, así como del nivel de contaminación exterior, de modo que se favoreciera el enfriamiento gratuito en verano (free-cooling), garantizando a la vez un mínimo enfriamiento en invierno, y evitando, en cualquier caso, la entrada de partículas nocivas al edificio. La otra alternativa sería establecer una ventilación manual en los edificios, dejando está en manos de los usuarios. En este caso, sería imprescindible realizar una campaña informativa masiva para dar a conocer a los usuarios cuáles son las pautas de ventilación correctas, evitando así que los consumos de climatización del edificio se disparen.

La disminución del consumo de energía final del edificio, incorporando sistemas energéticos activos de alta eficiencia y sistemas de aprovechamiento de energías renovables son, sin duda, una medida adecuada, siempre que se consideren una vez que se haya hecho todo lo posible para minimizar la demanda térmica, por medio de una buena envolvente. En este sentido habría que revisar los factores considerados actualmente en el procedimiento de certificación de edificios nuevos

en España para evitar que edificios que incorporen calderas de biomasa o compensen sus consumos mediante paneles fotovoltaicos obtengan de un modo casi automático la máxima calificación energética “A”, independientemente de la calidad de su envolvente térmica, que es la verdadera clave de la eficiencia energética edificatoria. Una edificación sostenible conlleva, por tanto, minimizar la demanda térmica antes que los consumos o las emisiones asociadas a los equipos que la satisfacen.

Teniendo en cuenta lo anterior se debería seguir apoyando tal como se recoge en el Plan de Acción 2008-2012 de la E4 la mejora de la eficiencia energética de las instalaciones térmicas de los edificios existentes, mediante la sustitución de calderas convencionales por calderas de condensación con un rendimiento energético entre un 10% y un 20% superior al de una caldera convencional, cuyo coste adicional se compensa en un medio plazo con los ahorros de combustible obtenidos.

En edificios existentes se debería priorizar la sustitución de las calderas con peor rendimiento nominal que presenten pocas opciones de mejora, y en cualquier caso, antes de proceder a la sustitución, verificar siempre por medio de un balance de energía que no haya ineficiencias significativas en el sistema de distribución del calor (como por ejemplo, un desequilibrado hidráulico de las redes de distribución, un aislamiento deficiente en los depósitos de acumulación o en las tuberías de distribución tanto de retorno como sobretodo de impulsión, o bien una regulación inadecuada que no considere la programación horaria ni la temperatura exterior), que pudieran llegar a reducir o incluso anular las ventajas de la sustitución del equipo generador. Por otra parte, conviene reseñar que en muchas ocasiones, se puede obtener una considerable mejora del rendimiento del equipo generador mediante la ejecución de sencillas operaciones de mantenimiento con una mínima inversión, como por ejemplo, una limpieza de la superficie de intercambio de la caldera y la chimenea de salida de humos; una adecuada regulación de la combustión, evitando el exceso o la falta de aire; una limpieza y/o sustitución del quemador, especialmente si se trata de un quemador no modulante; un aprovechamiento del posible calor residual de los gases de combustión para precalentar el aire de combustión; y una mejora del aislamiento térmico de la carcasa de la caldera. A pesar de que la normativa vigente obliga al mantenimiento de estos equipos, en numerosas ocasiones se presentan deficiencias que incrementan los consumos energéticos y disminuyen la vida útil de los equipos.

En lo que respecta a los edificios nuevos, la incorporación de calderas de condensación debería convertirse en un requisito de obligado cumplimiento en el corto-medio plazo.

A escala doméstica, las calderas de biomasa para calefacción o ACS son minoritarias en un mercado en el que siguen predominando sistemas que utilizan combustibles fósiles. La resistencia de proyectistas y usuarios hacia los cambios tecnológicos así como su precio y la problemática del suministro de combustible, son las principales razones para ello. Actualmente, los usuarios pueden beneficiarse de subvenciones a la inversión en instalaciones domésticas de producción térmica a partir de la biomasa por lo que es previsible que el mercado crezca en un futuro muy próximo. Es preciso, por tanto, implantar una normativa específica para las instalaciones térmicas de biomasa en los edificios, que reduzca problemas a la hora de proyectar, ejecutar y legalizar instalaciones en el sector doméstico.

Para su plena incorporación, es requisito fundamental que el mercado asegure a los usuarios un suministro de biomasa con las mismas condiciones de precio, servicio y calidad que los combustibles convencionales utilizados habitualmente. Las pocas empresas que se dedican a la logística de biomasa, son casi siempre antiguas empresas de distribución de carbón, que han derivado parte de su negocio hacia la biomasa pero que en ocasiones han tenido que exportar parte de su producción (con el consiguiente aumento del impacto ambiental) al no existir suficiente demanda. Una de las opciones para el suministro de combustible a calderas domésticas es la fabricación y comercialización de biomasa densificada en forma de pellets. No obstante, en la actualidad es necesario conseguir una adecuada economía de escala que ayude a disminuir el alto precio actual de los pellets en España.

Por tanto, la sustitución de las calderas convencionales por calderas de biomasa, debe promoverse de un modo “racional”, y en ningún caso generalizado a todos los edificios residenciales. Esta sustitución “racional” conlleva considerar la disponibilidad de biomasa en entornos locales, ya que en caso contrario el impacto del transporte podría reducir o incluso anular las indudables ventajas medioambientales que supone el uso de este tipo de combustible. Esta circunstancia unida al elevado coste de este tipo de calderas hace que la aplicabilidad de esta medida a pesar de su indudable interés se vea claramente limitada.

La obligatoriedad de instalar captadores de energía solar térmica en nuevos edificios y edificios a rehabilitar impuesta por el Código Técnico de la Edificación no ha permitido el acercamiento a los objetivos establecidos en el Plan de Energías Renovables 2005-2010, debido a dos factores: por un lado, la paralización que se ha producido en la actividad del sector de la construcción estos últimos años, y por el otro, a la falta de cumplimiento de la normativa que se produce en algunos casos, derivado de la carencia de una herramienta de cálculo estándar que ayude a los proyectistas a realizar los cálculos de la instalación solar térmica cumpliendo con todos los requisitos exigidos. El ahorro en combustible que hubiera supuesto aprovechar los 3,5 millones de viviendas construidas durante los últimos 5 años para instalar captadores solares térmicos hubiera alcanzado los 245 millones de euros. La instalación de un sistema solar térmico en las promociones de obra nueva apenas supone un coste adicional del 0,5-0,8% sobre el coste total del proyecto. El importe promedio por vivienda varía entre 1.100 y 1.400 euros, y además existen ayudas públicas a nivel nacional, a través de distintos mecanismos de financiación gestionados por el IDAE; y a nivel autonómico, a través de las correspondientes Agencias Regionales de la Energía o Departamentos de Industria de los Gobiernos Autonómicos. Un captador solar térmico de tan sólo 2 m<sup>2</sup> sobre el tejado de una vivienda permite cubrir entre el 30 y el 70% de las necesidades de agua caliente, dependiendo de su ubicación geográfica y la idoneidad de su orientación. Este ahorro para la economía familiar puede parecer pequeño, pero a escala nacional se podría traducir teóricamente en una cantidad entre 1.000 y 1.500 millones de euros, si en todas las viviendas españolas hubiera un sistema solar térmico adecuadamente diseñado, ejecutado y mantenido. En la práctica dicha cantidad se vería reducida debido a que muchos edificios ya existentes no tienen acceso al sol ni espacio disponible, y además en muchos casos las instalaciones se sobredimensionan y no se mantienen adecuadamente, lo que da lugar a importantes malfunciones que reducen notablemente los ahorros obtenidos. Por ello, estos aspectos deberían ser especialmente controlados desde las Administraciones.

La inclusión de la energía solar fotovoltaica en el Código Técnico de la Edificación supone una apuesta legislativa necesaria (pero insuficiente al restringirse a nuevos

edificios terciarios), en una tecnología que cuenta en España con unos niveles técnicos de diseño y ejecución muy altos, además de altos índices de radiación solar. Esta normativa puede suponer, por tanto, un cierto estímulo en el desarrollo de la energía fotovoltaica en núcleos de población, estableciendo un mínimo de potencia fotovoltaica a instalar en determinados nuevos edificios del sector terciario (como nuevos edificios administrativos, de oficinas, centros comerciales, centros de ocio, hospitales, hoteles, pabellones y recintos feriales), evitando así que su uso se restrinja a unos pocos edificios singulares. No obstante, a pesar de que la instalación de paneles fotovoltaicos sobre las cubiertas de los edificios, permite obtener ahorros significativos, la disponibilidad de espacio en unos casos y la falta de integración arquitectónica en otros, unida a la elevada inversión y al descenso progresivo en las primas existentes por la energía vertida a la red limitan la aplicabilidad de esta medida al sector de la edificación.

No conviene olvidar la enorme influencia del factor usuario sobre los consumos de energía final, que puede contrarrestar o incluso llegar a anular los ahorros obtenidos mediante los equipos descritos anteriormente. En este sentido, es imprescindible realizar campañas divulgativas que proporcionen al usuario una información clara y precisa sobre los hábitos de uso adecuados, de modo que durante el invierno, se programe una temperatura de consigna de unos 20°C (2°C menos en las habitaciones y 2°C más en los baños), se apague la calefacción cuando las ventanas estén abiertas, se ventile durante 10-15 minutos, se cierren las persianas por la noche, y no se coloquen muebles delante de los emisores térmicos de calefacción; mientras que durante el verano se programe una temperatura de consigna de 25°C, se limpien los filtros de los equipos de aire acondicionado y se ubique el condensador de dichos equipos en zonas aireadas y resguardadas del sol, se ventile la casa a primera hora de la mañana cuando la temperatura exterior es menor, se abran las persianas y ventanas de las habitaciones por la noche y se utilicen los toldos o parasoles durante las horas centrales del día.

La incidencia del factor usuario en los consumos de energía para calefacción se hace especialmente patente en las instalaciones de calefacción centralizadas en las que no se consideran los consumos de cada vivienda en la facturación de los gastos correspondientes. En la actualidad, el Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios establece la obligatoriedad de contabilizar la energía térmica para cada usuario del sistema de producción térmica centralizada, y para la propia central de producción térmica si su potencia supera los 400 kW. Por ello, la prioridad actual sería promover en edificios existentes, siempre y cuando sea posible, la instalación de contadores de energía térmica con termostato en cada vivienda que permita realizar una facturación en función del consumo real de calefacción de cada vivienda. La implementación de esta medida podría llegar a reducir los consumos finales de calefacción hasta en un 20%.

En lo que respecta a la refrigeración de las viviendas, en los últimos años se ha producido en España un importante efecto rebote, propiciado por el aumento del poder adquisitivo, el bajo coste de la energía y las tecnologías de refrigeración a la baja en precios. De hecho, en el sector doméstico, estos últimos años, se han llegado a vender cerca de 1.500.000 equipos de aire acondicionado o bomba de calor al año, en algunas ocasiones de deficiente calidad, con una corta vida útil y un mal rendimiento. De este modo, demandas de refrigeración relativamente pequeñas que tradicionalmente habían sido cubiertas mediante ventiladores han dado paso a la instalación masiva de equipos individuales de aire acondicionado incrementando las islas de calor de las zonas urbanas y los picos de demanda eléctrica en verano e imposibilitando la aplicación de técnicas de ventilación

natural nocturna. En climatologías cálidas y secas, este efecto rebote podría atenuarse mediante la instalación de sistemas de enfriamiento evaporativo funcionando en ventilación cruzada en sustitución de los equipos de refrigeración convencionales basados en la compresión de refrigerante. Este tipo de enfriamiento, evaluado positivamente por la normativa vigente para la calificación energética de grandes edificios terciarios, debería también considerarse en la calificación energética de viviendas y otros edificios, ya que permite reducir el consumo final de refrigeración hasta en un 75%, manteniendo las mismas condiciones de confort térmico y con una inversión entre 3 y 4 veces menor que la de un equipo convencional. La principal precaución con este tipo de equipos es garantizar la entrada al enfriador de aire exterior y no de aire recirculado de la propia vivienda.

Del mismo modo, la incorporación de masas de agua, fuentes y surtidores en el entorno de los edificios ubicados en climas cálidos y secos, característica tradicional en la civilización árabe, produciría un efecto de enfriamiento evaporativo, contribuyendo a atenuar las variaciones diarias en la temperatura exterior, aumentando el grado de humedad relativa en las inmediaciones del edificio, y disminuyendo su demanda térmica.

En las últimas décadas, se ha incrementado notablemente el número de edificios que disponen de una o varias plantas subterráneas para el estacionamiento de vehículos privados. Puesto que esta circunstancia no tiene prácticamente ninguna incidencia sobre los consumos directos del edificio, la actual normativa sobre eficiencia energética edificatoria no incluye este aspecto, a pesar de que aumenta muy notablemente los consumos indirectos del edificio. Por un lado, se incentiva un tipo de movilidad basado en el uso masivo del vehículo privado, aumentando el importante peso que tiene la movilidad en el impacto global de un edificio, pero además las grandes cantidades de hormigón armado necesarias para la construcción de este tipo de plantas producen un espectacular aumento de la energía incorporada en los materiales que conforman la vivienda. De hecho, las emisiones de dióxido de carbono asociadas a la construcción del parking en un unifamiliar suponen casi la mitad de las emisiones causadas por el vehículo que alberga durante su vida útil. Por todo ello, y teniendo en cuenta también el ahorro económico en materiales, el impacto de los parkings subterráneos, especialmente en unifamiliares, debería incluirse como un nuevo aspecto a regular dentro de la normativa de eficiencia energética edificatoria, fomentando asimismo el concepto de multipropiedad de los vehículos a través de empresas de “*car sharing*”.

Otro aspecto esencial pendiente de regular es la posibilidad de adosar los edificios. En los edificios adosados, dependiendo de su forma y geometría, se puede llegar a producir una importante reducción de la superficie de envolvente expuesta a las condiciones ambientales exteriores, que al adosarse a otro edificio pasaría a ser adiabática, produciendo una reducción en los consumos finales de calefacción y refrigeración que podrían alcanzar casi hasta el 60% y el 25% respectivamente, en caso de que el porcentaje de superficie adosada del edificio respecto a la superficie total de la envolvente sea significativo. Además se reduciría ligeramente el uso de materiales, ya que al adosar los edificios, disminuiría la necesidad de aislamiento térmico en los muros adosados correspondientes, a la vez que se liberaría una cantidad de terreno que podría dedicarse a superficie verde. Un ejemplo de la importancia del adosado de edificios es la comparación entre los dos modelos de edificación considerados en este capítulo. Conviene recordar que el modelo unifamiliar adosado ofrecía un consumo inferior al del bloque de viviendas no adosado, que además tenía una mayor tasa de ventilación.

Tradicionalmente no se ha utilizado un material aislante propiamente dicho para evitar las pérdidas de calor a través de los edificios, debido al gran espesor de los muros y la disposición de los espacios alrededor del fuego principal ubicado normalmente en torno a la cocina de la vivienda.

En edificios del sector residencial, donde las cargas internas son normalmente reducidas es de vital importancia calcular correctamente el espesor de aislante que minimiza el impacto global considerando tanto la energía incorporada en el aislamiento como la energía necesaria para la climatización del edificio. Teniendo en cuenta ambos aspectos se observa que el aislamiento óptimo en viviendas supera los espesores mínimos establecidos por la normativa vigente en un rango de 5 a 13 cm.

Conviene diferenciar entre el efecto del aislamiento en los muros verticales y en las cubiertas horizontales. En los muros, el aislamiento contribuye principalmente a reducir las pérdidas en invierno, y su efecto es mayor en climas fríos, y en muros donde la exposición solar es menor (orientaciones norte, este y oeste) y/o estén expuestos al viento dominante y/o sombreados durante el invierno. Por lo contrario, en las cubiertas horizontales, se reducen las pérdidas en invierno, pero sobretudo las aportaciones en verano. El efecto es mayor en edificios de poca altura con 1 ó 2 plantas, siendo irrelevante en cubiertas de edificios de gran altura y/o que cuenten con espacios de amortiguación térmica, como los trasteros o zonas de almacenamiento no habitables.

Puesto que los ahorros obtenidos son mayores en edificios existentes sin aislar y con cerramientos delgados, que en edificios que dispongan de cerramientos gruesos o de algún tipo de aislante (aunque sea insuficiente), se considera importante seguir promoviendo la rehabilitación de la envolvente térmica de los edificios existentes dentro del Plan de Acción 2008-2012 de la E4, mediante la incorporación de un aislamiento térmico, pero priorizando siempre, tal y como se ha expuesto, su aplicación en los edificios y cerramientos que presenten un mayor potencial de ahorro.

Una buena opción para la rehabilitación de la envolvente térmica en edificios existentes son los sistemas de fachada ventilada, formados por losas exteriores donde se pueden utilizar materiales de bajo impacto (piedra, arcilla aligerada, etc.) pudiendo llegar incluso a integrar paneles fotovoltaicos o captadores térmicos de tubos de vacío; una cámara de aire y una capa aislante anclada al muro del edificio. El “efecto chimenea” derivado del calentamiento de las losas exteriores ayuda a estabilizar la temperatura interior del edificio durante todo el año, reduciendo los consumos de energía final para climatización del edificio al menos en un 25%, y limitando las posibles condensaciones superficiales e infiltraciones de agua y los posibles puentes térmicos existentes, a la vez que se reduce la entrada de ruidos procedentes del exterior del edificio. Además, los sistemas de fachada ventilada conllevan una mayor automatización en su producción y ofrecen una mayor modularidad, permitiendo su fácil instalación y desinstalación, lo que favorece la reutilización, reciclaje o valorización selectiva de cada uno de los materiales al final de su vida útil.

En general, el impacto asociado a la fabricación, transporte y disposición final del aislamiento en el ciclo de vida completo del edificio no es muy significativo en comparación con otros materiales de construcción. Esto se debe a que el reducido peso que presentan los aislantes, compensa en buena medida su elevado impacto por unidad de peso. Tal como se ha demostrado, la sustitución de un aislamiento

convencional como el poliestireno por otro de origen natural como el corcho permitiría obtener, con un pequeño sobrecoste adicional, una disminución en las emisiones equivalentes de dióxido de carbono globales del edificio en torno al 2%.

Por todo ello, aún a pesar de no ser una medida de alto impacto, se deberían introducir disposiciones legislativas que incentivaran el uso de materiales de origen natural o reciclado. Como conclusión, cabe decir que el aislamiento de los edificios residenciales es aconsejable, especialmente en zonas con inviernos rigurosos, siempre y cuando se realice en su justa medida y utilizando, en la medida de lo posible, materiales aislantes de origen natural o reciclado.

Sin embargo, esta reflexión no se puede generalizar para otras tipologías de edificios. Por ejemplo, los edificios del sector terciario con elevadas cargas internas, pueden llegar a requerir frío todo el año, aún estando ubicados en climatologías frías. De hecho, en este tipo de edificios, el aislamiento térmico se convierte frecuentemente en un elemento perjudicial, que impide la necesaria transferencia de calor del edificio al exterior.

Un centro comercial ubicado en el centro de una ciudad como Madrid, a pesar de estar ubicado en una zona climática fría, la gran cantidad de calor producido por las cargas internas, origina que, para alcanzar el confort térmico, en pleno invierno sea necesario hacer funcionar los equipos de refrigeración para disipar la carga térmica generada en su interior por la alta densidad de ocupación, la iluminación y otros equipos. Esta situación resulta nefasta desde el punto de vista del ahorro de energía. Por ello, a este tipo de edificios se les debe permitir “perder” parte de su calor interno a través de sus cerramientos y, como mucho, exigirle protegerse de la radiación solar directa. Por ello, la incorporación de aletas en los edificios, unido al aprovechamiento del enfriamiento gratuito con aire exterior, que posee menor entalpía que el interior, y al uso de chimeneas solares combinadas con la entrada de aire exterior a través de tuberías enterradas son soluciones que proporcionarían importantes ahorros de energía.

Del mismo modo, la incorporación masiva de equipos informáticos, incluyendo ordenadores y sobretodo servidores, que se ha producido durante las últimas décadas especialmente en los edificios de oficinas, ha incrementado notablemente las cargas internas de dichos edificios, convirtiéndose en importantes emisores de calor. Pero además, el uso cada vez más extendido de Internet y los servicios online ha ocasionado un crecimiento exponencial de los centros de datos. A modo de ejemplo, los centros de datos de la compañía Google representan el 1% del consumo energético mundial, con una tendencia creciente. Además hasta un 60% de ese consumo de energía se debe a la refrigeración de los servidores que deben mantenerse siempre a una temperatura entre 21 y 23°C.

En el caso concreto de los servidores informáticos cabe plantearse el aprovechamiento del calor que generan para disminuir la demanda térmica del propio edificio en el que se ubican, o cuando esto no sea posible, aprovecharse como fuente de calor en edificios próximos. Para ello, se debería promover el uso de sistemas de refrigeración con agua, más efectivos aunque también algo más caros, que los sistemas de refrigeración convencionales con aire. En este sentido, la experiencia de Helsinki, donde el calor obtenido de cientos de servidores informáticos pertenecientes a un gran centro de datos va a ser capturado y canalizado a la red de tuberías de agua caliente que constituyen el sistema de calefacción urbana de la ciudad, proporcionando calor suficiente para calentar hasta 500 viviendas, debería extrapolarse a medio plazo a cualquier ciudad ubicada

en una climatología donde exista una demanda de calefacción durante los meses de invierno. Con ello se conseguiría que una proporción considerable de la demanda de calefacción de las ciudades sea cubierta a partir del calor de los servidores informáticos, consiguiendo un doble ahorro en calefacción de las viviendas y en refrigeración de los equipos.

Los mayores intercambios de calor entre el edificio y el ambiente exterior se producen a través de la superficie acristalada, que constituye, por tanto, uno de los elementos esenciales a considerar en la rehabilitación de la envolvente térmica del edificio. Conviene reseñar que, por lo general, un metro cuadrado de superficie acristalada pierde del orden de cinco veces más energía que la misma superficie de cerramiento.

A pesar de ello, una gran parte de los edificios terciarios, especialmente los edificios de oficinas, se han diseñado durante estos últimos años, atendiendo a criterios meramente estéticos, con una superficie acristalada excesiva, sin considerar criterios energéticos como su orientación o los necesarios elementos exteriores de sombreado.

Por el contrario, el acristalamiento de terrazas y galerías exteriores en los edificios residenciales, especialmente en aquellos construidos en la década de los 60 y 70, se traduce en una mejora de su envolvente térmica, una reducción de los ruidos exteriores y una mejora de la habitabilidad con una mínima inversión para los usuarios. Sin embargo, en la mayor parte de los Ayuntamientos existen actualmente normas urbanísticas que prohíben esta práctica, estableciendo sanciones a los usuarios. Por ello, se propone una modificación de dichas normativas para permitir acristalar terrazas y galerías, así como la paralización de los expedientes sancionadores ya abiertos, estableciendo unos requisitos mínimos para respetar la estética, como por ejemplo que el proyecto de cerramiento sea común para toda la fachada, y un mínimo de antigüedad para el edificio, a fin de evitar que el precio exigido por los promotores sea mayor, al asumir la inmediata conversión de la superficie de terraza en superficie habitable.

En definitiva, los criterios energéticos no son incompatibles con los criterios estéticos, sino que puede y debe favorecerse la integración de ambos criterios en la edificación.

A pesar de que el impacto de la fabricación, transporte y disposición final del vidrio doble o triple es superior al del vidrio simple, en edificios residenciales, la disminución que se consigue en el consumo de energía final para calefacción del edificio, compensa sobradamente dicho impacto, así como el ligero aumento que se produce en el consumo de energía final para refrigeración, como consecuencia de la mayor dificultad para disipar calor.

Las actuaciones sobre el acristalamiento originan por tanto modificaciones en la ganancia de calor solar y en las pérdidas por transmisión, si bien la reducción de dichas pérdidas, por su importante peso en la demanda de energía final, es normalmente prioritaria frente a otras consideraciones. En cualquier caso, el interés de esta medida debe ser analizado para cada climatología siempre en base anual ya que los efectos favorables de una actuación para el régimen de invierno son generalmente de sentido contrario para el régimen de verano.

En una ventana, considerando todos los procesos de fabricación, transporte y disposición final, el impacto del marco es mucho mayor que el del vidrio, de modo



que un vidrio triple con marco de madera presenta un impacto muy similar al de un vidrio simple con marco de aluminio. Esto es debido a que los marcos de madera presentan un impacto en emisiones de CO<sub>2</sub> hasta 7 veces menor que los marcos de aluminio convencionales, además de presentar una menor transmisividad, que contribuye a reducir las pérdidas en la operación del edificio. Conviene destacar que en la climatología española la relación coste/beneficio en la sustitución de vidrio simple es mejor para un vidrio doble de una cierta calidad que para un vidrio triple, que sería más adecuado para la climatología del Norte de Europa. A la hora de analizar el espesor más adecuado para la cámara de aire del doble acristalamiento, hay que tener en cuenta que conforme éste aumenta, disminuye la conductividad térmica, manteniéndose prácticamente constantes el factor solar y la transmisión luminosa. En general, un espesor de 16 mm resulta adecuado en la mayor parte de los casos.

Por todo lo expuesto anteriormente, la sustitución de ventanas con vidrio simple y marco de aluminio por ventanas de vidrio doble con marco de madera debería ser una de las prioridades para la rehabilitación de la envolvente térmica de los edificios existentes contemplada en el Plan de Acción 2008-2012 de la E4, priorizando siempre la sustitución en edificios con mayor porcentaje de superficie acristalada ubicados en climatologías con mayor severidad climática invernal y en aquellas ventanas ubicadas en fachadas sombreadas u orientadas al norte o que coincidan con la dirección del viento dominante, obligando al mismo tiempo que se cambia la ventana a la incorporación de dispositivos de control solar, tales como persianas, cortinas exteriores enrollables, toldos o incluso vegetación de hoja caduca, en las orientaciones oeste, este y sur, que son las más críticas en el régimen de verano.

Otra alternativa para mejorar la envolvente térmica de los edificios es la sustitución de los ladrillos exteriores convencionales por bloques cerámicos de arcilla aligerada, con un menor impacto en su proceso de fabricación y ofreciendo una menor conductividad térmica, que reduce la necesidad de añadir un aislamiento adicional. Su alta resistencia a la compresión hace que estos bloques puedan usarse como muros de carga de los edificios. De hecho, el interés de esta medida está principalmente, tanto en obra nueva como en edificios cuyo aislamiento sea nulo o deficiente, en el uso de los bloques cerámicos como elemento estructural en sustitución de los pilares de hormigón armado convencionales; ya que en caso contrario los ahorros obtenidos son mucho más reducidos.

Por todo ello, esta medida debería ser también considerada dentro de la rehabilitación de la envolvente térmica de los edificios existentes del Plan de Acción 2008-2012 de la E4, priorizando siempre la sustitución en edificios en aquellos edificios en los que haya que reformar su estructura y que presenten mayores pérdidas a través de su envolvente.

Desde tiempo inmemorial, los microclimas han sido un aspecto esencial en la edificación. De hecho, la civilización humana ha buscado tradicionalmente lugares adecuados para protegerse de las condiciones meteorológicas adversas, tales como las laderas de las montañas orientadas al sur, los valles resguardados, las costas, las riberas de los ríos, etc.

En la actualidad, las cubiertas vegetales constituyen una buena solución para la mejora del microclima en los núcleos urbanos, ya que purifican el aire aumentando su proporción de iones negativos, absorben dióxido de carbono, producen oxígeno, y son un elemento esencial para conseguir regular la humedad y temperatura

ambientales, contribuyendo, por tanto, a reducir la isla de calor que se produce en los grandes núcleos urbanos en verano y a disminuir la demanda térmica de los edificios, con un mínimo aumento del peso (<3%) sobre las estructuras. Además el efecto atenuador de las cubiertas vegetales se puede potenciar rociando agua sobre dichas cubiertas, de modo que se propicie un enfriamiento evaporativo.

A modo de ejemplo, la incorporación de cubiertas vegetales en todos los edificios ubicados en el municipio de Madrid podría llegar a fijar unas 110.000 toneladas de carbono al año.

Del mismo modo, el aumento de las zonas verdes en superficie, en detrimento de los cada vez más extendidos suelos pavimentados con asfalto, hormigón o baldosas, conlleva igualmente importante mejora del microclima, pudiéndose llegar a reducir hasta 5°C la temperatura ambiente en las inmediaciones.

Por todo ello, desde las Administraciones se debería fomentar este tipo de cubiertas en obra nueva, que además resultan más económicas, así como la sustitución de cubiertas convencionales existentes por cubiertas vegetales, priorizando aquellas cubiertas que no tengan ningún tipo de aislamiento y que estén ubicadas en edificios de poca altura que tengan una mayor ratio de superficie de cubierta/superficie de envolvente, ya que es en éstas donde se producen los ahorros más significativos. Asimismo, a nivel municipal, se debería establecer la obligatoriedad de incluir siempre, dentro de cualquier planificación urbanística, un porcentaje fijo de zonas verdes en superficie con vegetación autóctona, de modo que contribuyeran a la compensación del impacto en la edificación, sin incrementar las necesidades de agua de riego.

La puesta en marcha de una estrategia nacional de valorización energética de los residuos en la industria cementera se considera fundamental para eliminar las diferencias normativas que existen en la actualidad entre las distintas Comunidades Autónomas y garantizar un menor impacto para todos los productos, como el cemento o el hormigón, que utilizan clínker como materia prima para su fabricación. Con ello se obtendría una disminución en los impactos indirectos de los nuevos edificios, consiguiendo una disminución en la energía incorporada y las emisiones asociadas a los materiales. La inversión necesaria para la aplicación de esta medida sería reducida, ya que no requiere de grandes cambios tecnológicos en la industria cementera.

En la climatología española, los nuevos edificios residenciales deberían diseñarse en la medida de lo posible de forma compacta, garantizando unas adecuadas condiciones de habitabilidad para los usuarios. La tendencia al aumento en la superficie útil de las viviendas, que se hace especialmente patente en los unifamiliares ubicados en el extrarradio de las grandes ciudades y en las áreas rurales, lleva consigo normalmente una disminución en la compactidad y un aumento en los consumos de climatización y en la cantidad de materiales utilizados. Por ello, se debería abrir un debate a nivel nacional, en el que participen todos los agentes del sector de la edificación, sobre cuál debería ser la superficie útil de vivienda necesaria para que los usuarios puedan vivir en ella de un modo digno.

La repercusión del transporte en el impacto del ciclo de vida de los materiales de construcción, considerando el transporte de las materias primas a la planta de fabricación, el transporte a obra de los productos fabricados y el posterior traslado de los mismos a los puntos de disposición final, es muy significativo. Por ello una

reducción del impacto del transporte, mediante la sustitución del transporte por carretera por el transporte ferroviario y el uso tradicional de materiales locales, se traduciría directamente en una reducción del impacto de los materiales de construcción.

Hay que recordar que España es uno de los países europeos con un menor peso del transporte ferroviario de mercancías, situándose por debajo de la mitad de la media de la Unión Europea; mientras mantiene un fuerte peso en el transporte por carretera, sólo por detrás de Alemania. Por ello, es preciso equilibrar el reparto modal, sustituyendo progresivamente el transporte por carretera por el transporte ferroviario de menor impacto, a la vez que se mejora la intermodalidad.

La necesaria disminución de la distancia de transporte recorrida por los materiales de construcción, especialmente de aquellos que presenten una mayor densidad, apostando por la utilización de materiales de ámbito local, no es una tarea fácil, ni que pueda abordarse únicamente desde un solo país. Para ello, se debería plantear una estrategia internacional de “desglobalización” progresiva, que propiciara el resurgimiento de las empresas y negocios locales, que además de contribuir a una mejora medioambiental pueda ayudar a una reactivación económica, puesto que este tipo de empresas constituyen la verdadera base que permite el funcionamiento de la economía real.

A las medidas anteriores habría que añadir las posibilidades de mejora de la eficiencia energética en el transporte por carretera, que incluyen: la gestión eficiente de las flotas de transporte de mercancías, la mejora del mantenimiento de los vehículos y su renovación en caso necesario, la formación para el desarrollo de un estilo de conducción eficiente, la instalación de ralentizadores en vehículos pesados, y el uso progresivo de motores eléctricos y/o híbridos y de nuevos combustibles como los gases licuados del petróleo o el gas natural comprimido.

Conviene recordar que un mal ajuste del sistema de encendido y de alimentación aire-combustible conlleva un aumento del consumo del 30%, y un déficit de presión en los neumáticos de 0,3 bar o una desalineación de 1° en la dirección suponen respectivamente un 3% más de consumo. Por todo ello, es preciso aumentar el control por parte de la Administración para garantizar que los vehículos están correctamente mantenidos. Por otra parte, la aplicación de la tecnología G.P.S. al transporte de mercancías permite optimizar los recursos humanos y técnicos de las empresas, consiguiendo una planificación racional de las rutas y de la carga transportada con el consiguiente ahorro de combustible que todo ello supone. Por último, el factor usuario vuelve a ser decisivo: una conducción eficiente con un uso apropiado de la caja de cambios y sus distintas relaciones, evitando aceleraciones y frenadas bruscas, utilizando los ralentizadores en vez de los frenos para evitar la pérdida de inercia del vehículo y la posterior aceleración, y apagando el motor cuando el vehículo esté parado más de 3 minutos, puede llevar a reducciones en el consumo de combustible de hasta el 20%.

El impacto asociado a la movilidad supera el 50% del impacto total del ciclo de vida de la vivienda, si se utilizan 2 vehículos para recorrer distancias superiores a 30 km/día. Por ello, tal como ha quedado patente en este capítulo, a pesar del evidente interés de todas las medidas anteriores, el verdadero caballo de batalla para reducir el impacto global de la edificación es la disminución y mejora de la movilidad urbana. Los ahorros obtenidos tanto en energía primaria como en emisiones de CO<sub>2</sub> superan con creces a los obtenidos con la aplicación de cualquiera de las otras medidas.

El planteamiento actual de la movilidad urbana está provocando importantes externalidades negativas, conduciéndonos a modelos insostenibles desde los puntos de vista energético, ambiental, económico y social. Un modelo de movilidad sostenible debería permitir acceder a todos los ciudadanos, en condiciones de equidad, al trabajo, la educación, los bienes y servicios y el ocio, sin ocasionar perjuicios que sobrepasen la capacidad del medioambiente para asumirlos, y eviten ruidos perjudiciales y pérdidas de tiempo útil a la población.

Por ello, la prioridad absoluta dentro de un plan de edificación sostenible debería ser la vuelta al tradicional diseño compacto y multifuncional en cualquier nuevo planeamiento urbanístico, así como la introducción progresiva de este modelo especialmente en las urbanizaciones dispersas y segregadas que se han construido durante estos últimos años.

Otras medidas a considerar deberían ser el establecimiento de restricciones al uso del vehículo privado en las Ordenanzas Municipales de Tráfico, la regulación de la construcción de nuevas plazas de aparcamiento público y privado en los municipios con el objetivo de mantener un “crecimiento cero en tráfico”. Las restricciones anteriores no deberían reducir la libertad de movilidad de los individuos, por lo que deberían ir acompañadas de una promoción del “*car sharing*” y el “*car pooling*”, así como de un fomento de los sistemas de transporte público eficaces e intermodales, cuyo impacto del ciclo de vida es un 50% inferior al de los vehículos privados.

Las Administraciones deberían impulsar de un modo decidido nuevas normativas que promuevan una edificación más sostenible. La entrada en vigor en 2006 del Código Técnico de la Edificación ha permitido superar el desfasado marco normativo de 1979, estableciendo un límite máximo para la demanda térmica de los edificios nuevos y los edificios a rehabilitar, dependiente de la climatología y del uso de los edificios.

Sin embargo, a pesar de que el Código Técnico es una normativa necesaria, es claramente insuficiente, al dejar de lado aspectos esenciales, existiendo numerosas carencias que deben necesariamente considerarse para conseguir una edificación sostenible y eficiente. En este sentido, un análisis energético completo de un sistema consumidor de energía en general, y de un edificio en particular debe abordar tanto los consumos directos como los consumos indirectos. Los consumos directos son consecuencia del uso diario y son en los que se ha centrado el Código Técnico. Sin embargo, los consumos indirectos o energía incorporada, que en ocasiones es tan importante o más que los anteriores, han sido los grandes olvidados. Los consumos indirectos engloban la energía empleada para producir, transportar, instalar y retirar al final de su vida útil todos los materiales y equipos empleados en la vivienda, así como la movilidad de los usuarios de los edificios. Esta movilidad conlleva un aumento de los consumos de transporte derivados de los desplazamientos diarios a los edificios, especialmente en los nuevos modelos de ciudad dispersa que han surgido durante los últimos años. Por mucho que el edificio sea muy eficiente desde un punto de vista energético, el aumento de los consumos indirectos conlleva que el consumo energético inducido por la edificación aumente en términos globales. Para conseguir una adecuada implantación de procedimientos de facturación progresiva en los costes energéticos, es necesario considerar tanto los consumos directos como los indirectos desde una perspectiva de ciclo de vida, ya que, de otro modo, las necesarias políticas de fiscalidad medioambiental resultan difíciles de aplicar.

No hay que olvidar que entre las viviendas, el sector terciario y el transporte asociado a las mismas se consume más del 40% de la energía final de nuestro país. Hay medidas como la instalación de colectores solares térmicos para calentamiento de agua cuya repercusión en la reducción global de energía es escasa. Sin embargo su impacto social es muy grande. Estos esfuerzos hay que dirigirlos también hacia los consumos indirectos, donde medidas de alto impacto pueden conllevar descensos en consumos muy considerables.

Existe escasa interrelación en la redacción de los distintos documentos del Código Técnico, encontrándose especificaciones incompatibles que deben rectificarse. Tal es el caso de las limitaciones sobre la permeabilidad de las ventanas exigiéndose grados de estanqueidad altos, y por otro lado, especificando un número de renovaciones-hora de aire interior que en ocasiones no se puede satisfacer con las infiltraciones por puertas y ventanas, teniendo que practicar orificios en las fachadas.

Además se deberían establecer valores diferenciados de transmisividad de los cerramientos opacos en función de las cargas internas existentes en los edificios, ya que en la actualidad tan sólo se establecen diferencias para los valores del factor solar límite de los acristalamientos del edificio.

Por otra parte, el Código Técnico hace referencia a los edificios de nueva construcción y a la rehabilitación importante de los ya existentes, pero no incentiva a los ya existentes a adaptarse a las nuevas normas. Aproximadamente el 58% del parque inmobiliario español fue construido antes del año 1979, año en el que entró en vigor la NBE-CT-79, por lo que la calidad y el diseño de las infraestructuras energéticas se presume baja en la mayor parte de ellas.

Tal como se ha demostrado en este capítulo, el análisis de ciclo de vida de todas las entradas y salidas de energía y materiales en todas las etapas de la vida útil de los edificios es necesario para conseguir una eficiencia real. Los ahorros energéticos y la disminución de emisiones que se obtienen al aplicar esta metodología de carácter global superan ampliamente a los obtenidos a partir de las metodologías tradicionales y permiten identificar situaciones en las que los impactos se trasladan en el tiempo o en el espacio, dando lugar a aparentes ventajas, que en realidad no lo son. Por ello, es necesario un nuevo impulso normativo que incorpore el concepto de ciclo de vida para afrontar el gran reto de adaptar el sector de la edificación a la sostenibilidad. En este sentido, las Administraciones deben establecer normas que impongan criterios generales de ecodiseño en los edificios, estableciendo obligaciones y medidas concretas y efectivas e incorporando criterios de sostenibilidad en las Ordenanzas Municipales y en el planeamiento urbanístico, premiando a los promotores que lleven a cabo edificaciones sostenibles superando los mínimos establecidos, a través de subvenciones o exenciones fiscales.



## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

En este capítulo se realiza una síntesis de la tesis, se presentan sus principales contribuciones científicas, así como las perspectivas de estudios futuros y nuevas líneas de investigación que han surgido a partir de esta tesis.

### 6.1. Síntesis de la tesis

A diferencia de sectores como el automovilístico, donde cada modelo de vehículo consume progresivamente menos, los consumos energéticos asociados a los edificios y los procesos de urbanización son cada vez mayores, existiendo ciertas dificultades para que se desarrolle y aplique un saber acumulativo en este área de conocimiento. En esta tesis se ha demostrado que en nuevos edificios residenciales los **impactos indirectos** debidos a la fabricación de materiales, la construcción y fin de vida del edificio y la movilidad de sus ocupantes, no contemplados en la normativa vigente, pueden llegar a suponer el **80% del impacto global**, tanto en energía primaria como en emisiones de dióxido de carbono, destacando el impacto de la movilidad que supone el 56% del impacto global. No obstante, se ha demostrado, a través del modelo de curvas Ahorro-Inversión, el **enorme potencial de disminución de emisiones** existente, **9,4 veces mayor al contemplado en los actuales planes nacionales de ahorro**, y se han establecido unas directrices básicas de una futura estrategia nacional de edificación sostenible, que permita una mejora de la ecoeficiencia en toda la cadena de valor.

En el primer capítulo se presenta la evolución y situación actual del sector de la edificación en España, analizando diversos indicadores sociales, económicos y energéticos, y recopilando las principales líneas de actuación en eficiencia energética en la edificación, en el ámbito mundial, europeo y nacional.

El sector de la construcción tiene una enorme responsabilidad en la actual problemática energética y ambiental, siendo el mayor consumidor de energía en la Unión Europea (40%), y el principal contribuyente a las emisiones de gases de efecto invernadero (36%). En Europa, las **extracciones minerales** per cápita destinadas a la edificación ascienden a **4,8 toneladas por habitante y año**. Además, **cada metro cuadrado habitable requiere un total de 2,3 toneladas** de más de 100 tipos de materiales distintos, cifra que **se multiplica por 3 si se considera además el peso de los recursos afectados** por el proceso de fabricación. Por todo ello, se requiere implementar estrategias que permitan avanzar hacia la desmaterialización, el aligeramiento y la reutilización de los materiales en los edificios.

En España, el **parque edificatorio** es **ineficiente**, y está claramente **sobredimensionado e infrautilizado**, con una superficie útil en las viviendas cada vez mayor, un porcentaje creciente de viviendas secundarias (>16%) para pasar el fin de semana, las vacaciones, etc., así como una acusada preferencia social hacia la propiedad inmobiliaria, ayudada por una fiscalidad tradicionalmente ventajosa y una reglamentación insuficiente del mercado del alquiler, los bajos tipos de interés y los problemas de financiación de los Ayuntamientos y sus competencias urbanísticas, que han provocado que éstos se hayan financiado en buena parte del mercado de la construcción.

En nuestro país hay además **más de 3 millones de viviendas vacías**, lo que conlleva consecuencias negativas desde el punto de vista económico, debido a la existencia de un patrimonio sin aprovechamiento; pero sobre todo desde el punto de vista social, produciéndose un uso inadecuado de la propiedad, contrario al principio de su función social. Además, **la mayoría de las grandes ciudades españolas supera la biocapacidad disponible** en sus territorios circundantes, lo que significa que sus ciudadanos consumen más recursos y generan más residuos que los disponibles en su territorio. Incluso una ciudad como Teruel, necesita 5 veces su territorio municipal para satisfacer sus necesidades. Por todo ello, lo lógico sería **establecer una moratoria** que impida, o al menos limite, la construcción de nuevos edificios en España, promoviendo **nuevas fórmulas de multipropiedad** que garanticen una adecuada utilización y aprovechamiento de las viviendas vacías ya existentes.

Una de las características del proceso de urbanización en España es la **escasez de zonas verdes urbanas**. Tan sólo 15 capitales de provincia presentan una ratio de superficie verde urbana por habitante superior al mínimo propuesto por la Organización Mundial de la Salud, que es de 10 m<sup>2</sup> de zona verde por habitante.

Además el fuerte desarrollo inmobiliario de estos últimos años ha modificado el tradicional modelo urbanístico español caracterizado por su alta densidad de viviendas y de población y su complejidad, produciendo una **fragmentación y dispersión de las ciudades**, característica del modelo anglosajón, priorizando un crecimiento urbano expansivo frente a la reorganización de las áreas urbanas consolidadas. Este modelo disperso está basado en un **desarrollo segregado de sectores urbanos de actividad monofuncional**: zonas residenciales, parques empresariales o industriales, grandes centros de comercio y ocio, etc., que únicamente se conectan entre sí y con la ciudad consolidada mediante infraestructuras viarias, lo que produce un fuerte incremento de las necesidades de movilidad.

Desde una perspectiva energética y medioambiental, este cambio de modelo conlleva un mayor impacto, aumentando la ocupación del suelo y, por tanto, su artificialización y creando nuevas necesidades de movilidad e infraestructuras de transporte, energía y agua, que contrarrestan e incluso llegan a anular las posibles mejoras incorporadas en el diseño de los edificios. Además, desde el punto de vista social, este cambio de modelo conlleva una mayor individualización, disminuyendo la cohesión social y la comunicación entre los individuos.

**El parque de viviendas español es antiguo**: 12 millones de pisos tienen más de 30 años y 6 millones más de 50 años. No obstante, son los pisos construidos en el boom edificatorio de los años 60 los que presentan una peor calidad en su envolvente térmica e incluso, en algunos casos, deficiencias estructurales, debidas al uso de cemento aluminoso, lo que hace que su rehabilitación sea prioritaria frente a edificios de mayor antigüedad que cuentan con una mayor calidad constructiva, a pesar de no disponer de servicios básicos como ascensores, calefacción central, etc.

Por todo ello, en el contexto actual, hay que implementar sin más dilación las **tres “R” de la edificación**, que son **Rehabilitar, Reconstruir y Reutilizar**. En la actualidad, el derribo de los edificios al final de su vida útil hace que éstos se conviertan en una montaña de escombros en la que resulta muy complicado separar los distintos materiales, que terminan mayoritariamente en vertederos.



Por tanto, para posibilitar un adecuado reciclaje de los materiales de construcción es necesario promover un cambio radical en el diseño arquitectónico de los edificios, de forma que se **favorezca el desensamblaje de los materiales constructivos al final de su vida útil**, mediante uniones que sean fácilmente reversibles. Este importante cambio conceptual es ya una realidad en sectores como el del automóvil, donde la normativa vigente propicia que los fabricantes de automóviles diseñen los vehículos para facilitar el reciclado de sus distintos componentes a través de una adecuada selección de los materiales y técnicas de ensamblaje.

**La rehabilitación es una gran oportunidad** que hay que saber aprovechar, ya que permitiría poner en valor el enorme patrimonio construido en España, que dispone de más de 500 viviendas por cada 1.000 habitantes. La rehabilitación de un edificio supone generalmente un ahorro energético del 60% respecto a su derribo para volver a construirlo, pudiendo reaprovechar la estructura y al menos la mitad de la albañilería, lo que supone un ahorro de más del 50% en coste respecto a una obra nueva. Además, la rehabilitación supondría un cambio en el modelo de desarrollo del sector hacia la sostenibilidad, contribuyendo a su vez a la dinamización de la actividad en otros sectores productivos como las energías renovables, la eficiencia energética y los materiales ecológicos.

Pero, para que la rehabilitación se enfoque adecuadamente, lo primero que hay que preguntarse es: **¿cuál es el estándar de edificación sostenible que queremos conseguir?**

Los primeros intentos documentados de construir edificios de cero-energía buscaban en realidad conseguir **edificios de cero-calefacción**, mediante casas solares. Las **casas solares** cuentan con elevados espesores de aislamiento y alta captación solar. No obstante, la idoneidad de este estándar a día de hoy es cuestionable dependiendo de las cargas internas del edificio y de la climatología en la que se ubique. Además, los cada vez mayores consumos indirectos de los edificios son excluidos de toda consideración, lo que obliga a proponer nuevos estándares que permitan conseguir una edificación sostenible.

A pesar de ello, las casas solares han tenido una gran influencia en los actuales estándares de edificios de baja energía, como el **“Passive House”**, que aplican los principios de alto aislamiento, elevada estanqueidad al aire y sistemas de recuperación del calor de ventilación.

Un estándar impulsado tanto por el DOE como por el Parlamento Europeo son los **“Net Zero Energy Buildings”**, que son edificios que en su balance anual producen tanta energía como consumen, normalmente mediante instalaciones on-site de energías renovables.

Sin embargo, este estándar sigue siendo insuficiente, al no considerar los impactos indirectos de los edificios, por lo que la propuesta de esta tesis es apostar por un **nuevo estándar de “Life Cycle Zero Energy Buildings”**, donde la suma de su consumo anual directo (incluyendo calefacción, refrigeración, agua caliente, iluminación, etc.) y de su consumo anualizado indirecto (incluyendo la energía incorporada en materiales y sistemas, pero también la movilidad de los usuarios del edificio) se aproxime a cero.

El análisis de ciclo de vida de un edificio permite, por tanto, considerar el **impacto en todas las etapas de su vida útil**, desde la producción de sus materiales y equipamiento, hasta la propia construcción, el uso y mantenimiento del edificio y su disposición final. Actualmente, la normativa vigente está propiciando la minimización de los consumos asociados al uso del edificio, por lo que el impacto de los **materiales utilizados** (con un 20-30% sobre el total) y los impactos asociados a las **necesidades de movilidad** (con un 50-60% sobre el total) son cada vez mayores.

El incremento del consumo directo de la edificación en España -incluyendo los sectores residencial y de servicios- durante el periodo 1996-2007 fue de 9.880 ktep, lo que representa casi el 30% del incremento total del consumo de energía final en España, que ascendió a 33.300 ktep. Pero, si a dicho consumo directo se le añade el consumo indirecto asociado a la energía incorporada en los materiales de construcción, el **incremento de consumo asociado a la edificación alcanza el 42% del incremento total**.

En el capítulo segundo se realiza un completo estado del arte del análisis de ciclo de vida, desde sus orígenes hasta las últimas aportaciones metodológicas; y se demuestra la utilidad de aplicar esta versátil metodología para disminuir los consumos energéticos y emisiones de CO<sub>2</sub> del sector de la construcción, y establecer las estrategias de mejora medioambiental más adecuadas desde una perspectiva global.

A pesar de que existen estudios de ACV de productos industriales desde hace más de 40 años, su **aplicación al sector de la edificación es relativamente reciente** y requiere de un esfuerzo investigador para la correcta adaptación y simplificación de la metodología que garantice su uso generalizado por parte de los agentes del sector, ofreciéndoles aplicaciones específicas de ACV para edificios con criterios de homogeneidad que garanticen la obtención de resultados comparables.

**Numerosos aspectos metodológicos del ACV no gozan de un consenso científico total** y siguen siendo objeto de investigación, como la transparencia, homogeneidad y calidad de las fuentes de datos, o la idoneidad de los indicadores utilizados y sus procedimientos de cálculo y ponderación en las distintas metodologías de evaluación de impactos. En este sentido, hay que hacer notar la insensibilidad y **falta de adaptación de los estudios de ACV hacia los aspectos sociales y económicos**, ya que actualmente este tipo de estudios se centran en indicadores de tipo energético y ambiental.

Por ello, es preciso desarrollar indicadores y metodologías de evaluación de los impactos socioeconómicos, de modo que el ACV pondere adecuadamente los tres pilares básicos de la sostenibilidad: medioambiente, sociedad y economía. Además, con objeto de disponer de fuentes de datos más completas y adaptadas que las actuales se debería **obligar a cada fabricante a declarar la huella energética y de carbono de su producto**, de acuerdo con unas reglas comunes y siempre bajo un control externo.

En la tesis se han utilizado como indicadores de impacto a evaluar: la **demanda de energía primaria acumulada**, la **huella de carbono**, la **huella hídrica** y la **puntuación única** del método Ecoindicador 99, en consonancia con las prioridades actuales a nivel europeo e internacional de reducción del consumo energético y las emisiones.

No obstante, el **carácter horizontal de la metodología propuesta** permite su aplicación para la evaluación de otras categorías de impacto que requieran ser consideradas en el futuro.

En la actualidad, el **desarrollo de estudios de ACV en España** es claramente **minoritario**, tanto a nivel de edificios como a nivel de producto, existiendo numerosas **barreras**, como la falta de exigencias legislativas e incentivos, la desvinculación entre el ACV y los procedimientos de certificación energética desarrollados en los últimos años, el desconocimiento generalizado de la metodología en el sector, la disponibilidad de herramientas y fuentes de datos adecuadas, y el coste económico que supone la realización de este tipo de estudios.

Para superar dichas barreras se deberían **establecer requerimientos normativos** relativos a la consideración de los impactos ambientales en la totalidad del ciclo de vida de los edificios, a la vez que se incentiva la realización de estudios de ACV y se promueve **la divulgación de la metodología** a todos los agentes del sector.

En el tercer capítulo se evalúa el impacto energético y ambiental de un conjunto representativo de materiales constructivos, proponiendo y cuantificando diversas medidas de mejora.

Desde una perspectiva de ciclo de vida, la reducción del impacto medioambiental de los edificios pasa por el uso de **materiales naturales o reciclados con bajo nivel de procesamiento industrial y de carácter tradicional y local** como el adobe, la piedra, la madera, el corcho, etc. En todos estos casos, la mayor parte de la energía asociada a su producción procede del sol, por lo que presentan un bajo nivel de consumo de energía no-renovable y de emisiones.

Al analizar los distintos **productos cerámicos (ladrillos, baldosas y tejas)** se observa que especialmente las baldosas cerámicas tienen una gran energía incorporada, debido principalmente al elevado consumo de gas natural durante su cocción (que supone el 80% de la energía en su fabricación). Además su huella energética puede multiplicarse por un factor de 1,6 en el caso de utilizarse arcilla de pasta blanca en vez de arcilla de pasta roja local, debido al mayor impacto del transporte. Respecto a las distintas tipologías de ladrillos, el uso de ladrillos de arcilla aligerada, ladrillos silico-calcáreos, o **bloques de tierra compactada** conlleva una importante disminución de los impactos en energía y emisiones. Estos últimos, a diferencia de los ladrillos silico-calcáreos, proporcionarían unas prestaciones similares a las de un ladrillo convencional, con una disminución de más del 60% en la energía incorporada por unidad de peso.

En general, los productos cerámicos presentan un **potencial de mejora** mediante el uso de quemadores de alta velocidad y la recuperación del calor de los humos en hornos de cocción para precalentar/secar el producto a cocer, permitiendo ahorrar hasta un 13% de la energía consumida en el horno, la sustitución de líneas de hornos antiguos por hornos túnel automáticos y continuos aumentando la eficiencia energética de este proceso en un 20%, y la instalación de sistemas de cogeneración, disminuyendo la energía incorporada en el producto en un 10%.

En cuanto a los **aislamientos**, el impacto de los aislantes termoplásticos -como el poliestireno o el poliuretano- es claramente superior al impacto de materiales naturales como el corcho, la fibra de madera y la lana de oveja, o reciclados como la fibra de celulosa. Mientras 1 kg de poliestireno expandido emite 7,3 kg CO<sub>2</sub>-Eq, y conlleva altos consumos altos de gas y petróleo para la producción del

etilbenceno utilizado como materia prima; 1 kg de lana de madera tan sólo emite 0,12 kg CO<sub>2</sub>-Eq, pudiendo incluso convertirse, al igual que otros aislamientos de origen biomásico, en sumideros de CO<sub>2</sub> en caso de que sean reciclados al final de su vida útil.

A pesar de ello, en la actualidad, la existencia de una fuerte red comercial de aislantes termoplásticos, unida al desconocimiento y prejuicios existentes en los distintos agentes del sector al uso de aislantes naturales y a su mayor coste económico, derivado de una deficiente economía de escala, hace que el uso de este tipo de aislantes sea minoritario. Para cambiar esta dinámica, se debería incentivar desde la Administración el uso de **materiales aislantes naturales o reciclados**, promoviendo la creación de una industria potente de este tipo de aislantes capaz de competir en igualdad de condiciones con los aislantes termoplásticos. Los beneficios medioambientales serían inmediatos. A modo de ejemplo, la sustitución total de la fabricación de aislamientos termoplásticos por aislamientos de origen biomásico, podría llegar a evitar la emisión anual de hasta 4,8 millones de toneladas equivalentes de dióxido de carbono a nivel nacional.

En lo que respecta a los **materiales basados en el cemento**, en España se podría conseguir una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> de hasta el 30% si se apostase decididamente por la **valorización energética de residuos** durante el proceso de fabricación del clínker, de modo que se sustituyeran, al menos parcialmente, las materias primas y combustibles fósiles actualmente utilizados. En la mayor parte de los países europeos, el porcentaje de uso de residuos para la fabricación de clínker se sitúa por encima del 35% -llegando incluso hasta un 80% en el caso de Holanda-, mientras que en España este porcentaje se queda tan sólo en un 5%. Esta valorización permitiría convertir residuos, que acabarían en un vertedero o incineradora, en recursos, con una inversión estimada entre 1 y 5 millones de euros por cada planta cementera.

Adicionalmente conviene destacar el **potencial de mejora tecnológica** existente en las plantas de fabricación de clínker que permitiría conseguir en el año 2050 una reducción en un factor de 2 de las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al cemento con respecto a los niveles de 1990.

Por otra parte, se debería promover el uso de **morteros de cal** frente a los morteros de cemento convencionales. Sus principales ventajas son la mejor transpiración del edificio y la absorción de CO<sub>2</sub> que se produce durante el proceso de fraguado, que puede llegar a suponer hasta el 62% de las emisiones que previamente se han producido en los procesos previos de descarbonatación y combustión, a diferencia de los morteros de cemento, donde dicha absorción es inferior al 2%.

Todas las reducciones anteriores son de vital importancia en el sector de la edificación, ya que los materiales producidos a partir de cemento suponen habitualmente el 40-60% del peso de un edificio, por lo que condicionan claramente su impacto.

Respecto a los materiales de construcción basados en la **madera**, debido a su bajo procesado industrial, presentan generalmente unos impactos muy reducidos, con un **balance en emisiones de CO<sub>2</sub> casi neutro, que incluso podría ser negativo**, produciendo una absorción neta de emisiones si el producto es reciclado o reutilizado en vez de incinerado al final de su vida útil. En el contexto actual donde se está promoviendo e invirtiendo grandes cantidades de dinero en la captura y confinamiento del CO<sub>2</sub> de las plantas termoeléctricas, debe considerarse que el uso

de madera estructural certificada en los edificios conlleva, una captura previa de CO<sub>2</sub> en los bosques y un almacenamiento de dicho CO<sub>2</sub> durante toda la vida útil del edificio (50 años como mínimo), que además puede extenderse en caso de que la madera sea reutilizada. Esto convierte a los **edificios con estructura de madera** en “**almacenes de CO<sub>2</sub>**” a promover por la Administración, consiguiendo una disminución de las emisiones de más de 1.000 kg de CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de estructura, al utilizar estructura de madera en vez de estructura de hormigón armado.

Con respecto a los impactos en **metales** como el aluminio, acero o cobre, su disminución requiere además de una racionalización en su uso, un aumento de la producción de la industria secundaria de estos metales en detrimento de la industria primaria que contribuye al agotamiento de las reservas de hierro, bauxita y cobre, y engloba procesos de alto impacto como la electrolisis y la piro-metalurgia, así como grandes necesidades de transporte. Desde las Administraciones se deberían establecer **incentivos al desarrollo de la industria secundaria** de estos productos, que ayudaría a preservar las reservas minerales del planeta. A modo de ejemplo, cada kilogramo de aluminio reciclado evita la emisión de 11,3 kilogramos de dióxido de carbono respecto a un kilogramo de aluminio primario producido, lo que supone una reducción del 93%.

La modalidad de transporte de las materias primas y productos terminados condiciona fuertemente su impacto final. Tal como se ha demostrado, la **sustitución del transporte por carretera** de mercancías relacionadas con la construcción **por el transporte ferroviario en trayectos de tipo medio-largo**, unido a la **mejora de la intermodalidad**, produciría en España un ahorro anual en energía primaria de 23.300 GWh, evitando la emisión anual de 6.700 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>.

En el capítulo cuarto se propone una **adaptación de los estándares metodológicos del ACV (ISO y CEN/TC 350)** para su **aplicación a tres edificios de bajo consumo** energético, evaluando la contribución al impacto de las distintas etapas y aspectos incluidos en el ciclo de vida, de cara a identificar los puntos críticos y poder proponer simplificaciones metodológicas.

En **edificios residenciales** se han obtenido unas ratios de impacto global en el ciclo de vida de **321,8 kWh de energía primaria demandada por metro cuadrado habitable y año de vida útil**, con unas emisiones equivalentes de **68,5 kg CO<sub>2</sub> por metro cuadrado habitable y año**. En estas ratios, los impactos indirectos - obviados en la normativa vigente- suponen casi el 80% del total, desagregados en la **movilidad** de sus ocupantes con el 56% sobre el total, la **fabricación de materiales y equipamiento** con el 19% del total, y la **construcción y fin de vida** del edificio con el 3% del total. En contraposición, los impactos directos derivados del **consumo de agua y energía** en el uso del edificio, representan el 22% del impacto total, con una tendencia a la disminución a medida que en las nuevas edificaciones se vaya adoptando el estándar de cero/cuasi cero energía propuesto por la Comisión Europea en la Directiva 2010/31/UE para el año 2020.

De lo anterior se deduce que el **impacto asociado a la movilidad urbana** es **más del doble que el impacto directo asociado al consumo energético de climatización e iluminación y al consumo de agua**. Los resultados de las encuestas realizadas para caracterizar la movilidad urbana evidencian que las grandes distancias existentes entre las zonas residenciales, los lugares de trabajo y las zonas comerciales, desincentivan el uso del transporte público y de la bicicleta, observándose un **uso masivo del vehículo privado en núcleos urbanos**, siendo

responsable del 76-82% del kilometraje realizado en los desplazamientos diarios vivienda-trabajo y del 96% del kilometraje realizado en los desplazamientos semanales vivienda-centros comerciales/ocio.

La reducción del impacto de la movilidad pasa por el desarrollo de **planes de rehabilitación urbanística basados en la densidad, compacidad y complejidad**, donde los lugares de trabajo, residencia, comercios y zonas de ocio se encuentren mezclados. Además, la Administración debería impulsar por medio de subvenciones, reducciones o exenciones de tasas a las empresas de “*car sharing*” y fomentar el “*car pooling*”, especialmente en aquellos centros de trabajo más alejados de las zonas residenciales, estableciendo carriles rápidos para los vehículos acogidos a esta modalidad.

Dentro de la etapa de producción del edificio, se ha demostrado que la **estructura** es uno de los aspectos que más importantes. En edificios que dispongan de más de 1 planta de aparcamiento subterráneo (circunstancia muy habitual, que además acrecienta las necesidades de movilidad urbana), la estructura puede llegar a suponer, excluyendo la movilidad, **hasta el 35% del impacto energético del ciclo de vida del edificio**, siendo el hormigón armado que la constituye responsable de hasta el 75% de la energía incorporada por todos los materiales y equipamientos del edificio. Por ello, como primera pauta de diseño se debería **aligerar el edificio**, con objeto de reducir la estructura necesaria sin comprometer su seguridad ni su vida útil. Adicionalmente se debería plantear el uso de estructuras de madera certificada y de árido reciclado en aquellos casos en que sea técnicamente posible. En definitiva, cabría aplicar la máxima de “**menos cemento y más talento**”.

Otro elemento que puede tener un cierto impacto en función de los materiales seleccionados son los muros exteriores. Para reducirlo, conviene **evitar el uso de revestimientos metálicos de fachada** que incrementan la energía incorporada en el edificio a razón de 1.600 MJ por cada metro cuadrado de revestimiento; así como sustituir los aislantes termoplásticos por aislantes naturales, y utilizar bloques de tierra compactada y materiales aligerados.

Por otra parte, se ha corroborado que el **impacto energético asociado a la fabricación del equipamiento energético** (calderas, bombas de calor, lámparas de iluminación, captadores solares térmicos, etc.) es **despreciable** frente a la energía que producen a lo largo de su vida útil. A modo de ejemplo, la energía necesaria para la fabricación de una caldera de calefacción supone el 8% de la energía primaria asociada al equipo a lo largo de toda su vida útil, de modo que en tan solo 2 años se habrá consumido la misma energía primaria requerida para su fabricación. En el caso de los captadores solares térmicos, dicho periodo se reduce a algo menos de 1 año.

Centrándonos en los **consumos energéticos directos**, se ha observado que su relevancia difiere significativamente al medirlos **en energía final o en energía primaria**. Así, en términos de energía primaria, considerando la eficiencia energética en todo el proceso y las infraestructuras necesarias para hacer llegar la energía al punto de consumo; la refrigeración e iluminación (que consumen energía eléctrica en baja tensión) tienen un impacto mayor que la calefacción y el agua caliente (que consumen gas natural a baja presión); invirtiéndose la situación al hacer el análisis en términos de energía final.

En lo que respecta al consumo de agua potable en el uso de los edificios, a pesar de que su impacto en términos de energía incorporada, potencial de calentamiento global o puntuación total del Ecoindicador 99 es poco relevante, presenta un gran potencial de mejora, teniendo en cuenta que las cifras de consumo de agua potable en los hogares de los distintos **municipios españoles duplican e incluso triplican la ratio de consumo sostenible de agua**, estimada por la ONU en 55 litros por persona y día.

Una **cubierta de 100 m<sup>2</sup> podría llegar a proporcionar 52.000 litros de agua de lluvia al año**. Por ello, se debería impulsar una nueva normativa obligando en zonas de alta pluviometría a incorporar sistemas de gestión y reutilización de las aguas de lluvia en el diseño de nuevos edificios y rehabilitaciones para todos los usos domésticos compatibles. Del mismo modo, se debería obligar a instalar sistemas de reutilización de aguas grises procedentes de duchas, bañeras, lavabos o bidés para poder cubrir la demanda de agua en inodoros y limpieza de exteriores, así como las posibles necesidades de riego de la parcela, satisfechas habitualmente con agua potable. En una **vivienda de 4 personas, reutilizando las aguas grises** para las cisternas de los inodoros **se obtendría un ahorro diario de 120 litros** con un mínimo sobrecoste estimado en 1.200 €.

Otro impacto de la edificación es la **pérdida de productividad primaria neta**, circunstancia que se ha hecho patente en numerosas zonas de la península, urbanizando y edificando en terrenos fértiles. Para evitar esta práctica, se deberían **establecer límites a la conversión de suelo agrícola en suelo urbanizable** a partir de unos índices determinados de fertilidad del terreno. Igualmente se deberían establecer **límites a la construcción de edificios en zonas donde el terreno no presente las características geotécnicas adecuadas**, como zonas inundables, lechos secos de ríos donde exista agua a poca profundidad, zonas con fallas geológicas o suelos arcillosos de poca resistencia, ya que en estos casos, la mayor estructura necesaria puede llegar a aumentar en casi un 30% la energía incorporada del edificio.

Finalmente en el quinto capítulo se utiliza la **metodología de ACV**, propuesta en el capítulo anterior, para evaluar de un modo cuantitativo el potencial de ahorro en España, en términos de energía primaria y de disminución del calentamiento global potencial, asociado a la puesta en marcha de un conjunto de medidas de ecoeficiencia en edificios residenciales, tanto nuevos como existentes, utilizando el **modelo de curvas Ahorro-Inversión**.

Se concluye que para conseguir una edificación sostenible es necesario volver a aplicar las estrategias propias de la **arquitectura vernácula**, basada en tradiciones constructivas ancestrales, adecuadas a la finalidad prevista, favoreciendo el aprovechamiento de microclimas y utilizando materiales disponibles en el entorno inmediato en ciclos cerrados. Estas estrategias han sido olvidadas durante las últimas décadas, por lo que es preciso recuperarlas y darles un nuevo enfoque aprovechando los nuevos avances tecnológicos. Además es necesario un nuevo acercamiento a la naturaleza, que convierta los edificios en organismos vivos habitables, adaptados armónicamente al clima, al lugar y a los usuarios, por medio de una **arquitectura orgánica**.

**El diseño arquitectónico debe ser la pieza clave**, por encima de la eficiencia de los sistemas y equipos energéticos o de la incorporación de energías renovables. Eso significa que antes de pensar en disminuir los consumos de energía de los equipos hay que pensar en minimizar la demanda térmica para calefacción y

refrigeración del edificio que tendrá que ser cubierta por dichos equipos, por debajo incluso de los límites normativos.

Minimizar dicha demanda no es una tarea sencilla, ya que supone actuar sobre las pérdidas a través de los cerramientos, las infiltraciones, el aporte solar y las cargas internas de los edificios, adoptando un **comportamiento diferente en función de la climatología en cada época del año**. Ajustar las **pérdidas por cerramientos** supone definir en el diseño del edificio una adecuada compacidad, aislamiento e inercia térmica. Del mismo modo, las **infiltraciones** están relacionadas con el sistema de ventilación propuesto, el número de renovaciones del aire y la posible recuperación de calor del aire de extracción. Por su parte, el **aporte solar** se puede controlar mediante una adecuada orientación del edificio, un acristalamiento diferenciado según la fachada, la incorporación de elementos para el control del sombreado y otros elementos bioclimáticos como invernaderos, muros Trombé, torres de refrigeración pasiva, etc. Respecto a las **cargas internas** del edificio, cabe decir que son difícilmente controlables, por lo que la única opción que cabe plantear es el aprovechamiento de calor mediante sistemas de intercambio agua-agua, mucho más efectivos que los sistemas aire-aire, agua-aire, o aire-agua.

La **correcta orientación de la fachada principal** de los edificios debe ser uno de los criterios fundamentales de diseño, ya que condiciona su demanda térmica a lo largo de toda su vida útil, siendo imposible establecer modificaciones en la orientación hasta el momento de derribo del edificio. La orientación sur con protecciones solares es la más favorable, debiendo evitarse las orientaciones este/oeste que pueden provocar un aumento superior al 25% en los consumos finales de climatización, debido al fuerte sobrecalentamiento que se produce en las mismas durante los meses de verano.

Un metro cuadrado de **superficie acristalada** pierde del orden de cinco veces más energía que la misma superficie de cerramiento. Por ello es de vital importancia su **diseño diferenciado**, incorporando **dispositivos de control solar**, en función de la orientación de la fachada. En general el vidrio doble con 16 mm de cámara de aire es el que resulta más adecuado para la mayor parte de zonas climáticas de España. En cuanto al marco, cabe destacar que la huella de carbono de la madera es 7 veces inferior a la del aluminio y casi 6 veces inferior a la del PVC.

Por otra parte, una ventilación inadecuada del edificio conlleva un aumento de su demanda térmica. Se ha observado que al multiplicar por cinco la tasa de renovaciones-hora, se duplica el consumo de energía final para climatización. La normativa no debería poner el énfasis en el cumplimiento de un determinado número de renovaciones-hora más o menos adecuado, sino en **establecer los periodos idóneos de ventilación a lo largo del año y a lo largo del día**, en función de la temperatura interior y exterior del edificio, pero también del nivel de contaminación exterior, favoreciendo el enfriamiento gratuito en verano y la recuperación de calor del aire de extracción en invierno.

En lo que respecta a la **refrigeración de las viviendas**, en los últimos años se ha producido en España un **efecto rebote**, debido al aumento del poder adquisitivo, el bajo coste de la energía y de los equipos de refrigeración, llegándose a vender cerca de 1.500.000 equipos al año, en muchas ocasiones de deficiente calidad, con una corta vida útil y un mal rendimiento. De este modo, demandas de refrigeración relativamente pequeñas, tradicionalmente cubiertas mediante ventiladores han dado paso a la instalación masiva de equipos individuales de aire acondicionado incrementando las islas de calor de las zonas urbanas y los picos de demanda



eléctrica en verano. En climatologías cálidas y secas, este efecto rebote podría atenuarse mediante la instalación de **sistemas de enfriamiento evaporativo**, funcionando en ventilación cruzada, en sustitución de los equipos convencionales basados en la compresión de refrigerante, permitiendo reducir el consumo final de refrigeración hasta en un 75%, con un coste de inversión entre 3 y 4 veces menor.

En edificios del **sector residencial**, donde las cargas internas son normalmente reducidas es importante **calcular el espesor de aislante que minimice el impacto global** considerando tanto la energía incorporada en el aislamiento como la energía necesaria para la climatización del edificio. Teniendo en cuenta ambos aspectos, la optimización del aislamiento supondría un **incremento en los espesores mínimos establecidos por la normativa vigente** en un rango de 5 a 13 cm. Con ello se obtendría una reducción, variable en función de la climatología y tipología del edificio, de 0,9 a 5,6 kg CO<sub>2</sub> por m<sup>2</sup> habitable y año en edificios que cumplan estrictamente con el aislamiento mínimo normativo, y de 6,2 a 22,7 kg CO<sub>2</sub> por m<sup>2</sup> habitable y año en edificios sin aislar.

Sin embargo, esta reflexión no se puede generalizar para otras tipologías de edificios. Los edificios del **sector terciario con elevadas cargas internas**, pueden llegar a requerir frío todo el año. A este tipo de edificios se les debería permitir “perder” parte de su calor interno a través de sus cerramientos y, como mucho, exigirles protegerse de la radiación solar directa. Un ejemplo de edificios con altas cargas internas son los edificios de oficinas, debido a la incorporación masiva de **servidores informáticos** que constituyen importantes emisores de calor a considerar en el diseño. En estos casos, se deberían instalar **sistemas de refrigeración con agua** que aprovecharan el calor generado por dichos equipos para disminuir la demanda térmica de calefacción y/o agua caliente del edificio.

En cuanto al tipo de cubiertas, se han demostrado las ventajas de las **cubiertas vegetales**: mejora del microclima disminuyendo la isla del calor en las ciudades, aumento de la inercia térmica del edificio amortiguando las oscilaciones térmicas, absorción de dióxido de carbono por medio de la fotosíntesis, todo ello con un mínimo aumento del peso sobre las estructuras del edificio, inferior al 3%. A modo de ejemplo, la incorporación de cubiertas vegetales en todos los edificios de una ciudad como Madrid permitiría fijar 110.000 toneladas de carbono al año.

Finalmente hay que volver a remarcar el **alto impacto asociado a la movilidad de los usuarios de los edificios**, que supera el 50% del impacto total del ciclo de vida de una vivienda, si en la misma se usan 2 vehículos privados recorriendo distancias superiores a 30 km/día en cada uno de ellos, circunstancia que se produce habitualmente. Por tanto, la disminución y mejora de la movilidad urbana es un aspecto esencial para reducir el impacto global de la edificación. Para ello, la prioridad sería volver al **tradicional diseño compacto y multifuncional** en cualquier nuevo planeamiento urbanístico, introduciendo progresivamente este modelo en las urbanizaciones monofuncionales y segregadas construidas durante los últimos años, en las que incluso se han eliminado los locales comerciales de la planta baja de los edificios. La disminución de movilidad asociada a este planteamiento permitiría evitar la emisión de 3,6 toneladas de CO<sub>2</sub>-Eq por vivienda y año.

Adicionalmente se deberían contemplar otras medidas como el establecimiento de **restricciones al uso del vehículo privado** en las Ordenanzas Municipales de Tráfico, la **regulación** de la construcción de nuevas **plazas de aparcamiento** público y privado, el fomento del “*car pooling*” y el “*car sharing*”, y la mejora del

**transporte público**, cuyo impacto del ciclo de vida es un 50% inferior al de los vehículos privados. Estas dos últimas medidas evitarían la emisión de 2,5-2,7 toneladas de CO<sub>2</sub>-Eq por vivienda y año.

Hay que remarcar el **alto impacto de las plantas subterráneas dedicadas al estacionamiento de vehículos**, que, por un lado, incentivan una movilidad basada en el uso masivo del vehículo privado, y por el otro, conllevan un aumento de la energía incorporada en los edificios, debido a las grandes cantidades de hormigón armado que requieren. A modo de ejemplo, las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la construcción de una planta subterránea de parking en un unifamiliar, cuantificadas en 20 tCO<sub>2</sub>-Eq, suponen prácticamente **la mitad de las emisiones causadas por el vehículo que alberga durante su vida útil**.

Se ha demostrado que la extrapolación de las medidas anteriores al conjunto del sector de la edificación residencial en España, utilizando el modelo de curvas Ahorro-Inversión, permitiría obtener para un mismo nivel de inversión una disminución de emisiones **9,4 veces mayor a la considerada en el Plan de Acción 2008-2012 de la E4** para el sector de la edificación. Asimismo se ha podido corroborar que el criterio de ordenación de las medidas a implementar debe ser siempre de mayor a menor ratio de ahorro/inversión.

Una edificación sostenible se debería caracterizar por un **equilibrio mantenido** entre la producción de materiales, su consumo para la construcción o rehabilitación de edificios y el uso de los recursos naturales necesarios. Para evitar que la producción de materiales afecte a los recursos naturales es preciso promover el uso de las **mejoras técnicas disponibles** y la **innovación** en las plantas de producción, y sustituir, en la medida de lo posible, el uso de recursos naturales finitos por residuos generados en distintos procesos productivos, **cerrando los ciclos de los productos**, lo que supone apostar claramente por la reutilización y el reciclaje, y minimizando en cualquier caso el transporte de las materias primas y productos, promoviendo el uso de recursos disponibles en ámbitos locales, estableciendo una **estrategia de “desglobalización” progresiva**, que propicie el resurgimiento de las empresas y negocios locales, que constituyen la verdadera base que permite el funcionamiento de la economía real.

En este sentido, no conviene olvidar la enorme influencia que tienen sobre la sostenibilidad del sector de la edificación los **hábitos de compra y uso de los edificios** que se han instalado en la sociedad actual. La excesiva demanda de compra de edificios que se ha producido durante la última década en España, en muchos casos, utilizados sólo como una más que discutible inversión de capital, ha ocasionado un desarrollo inmobiliario sin precedentes que, a su vez ha llevado a un ritmo de producción de materiales totalmente insostenible. Por ello, la elaboración de una estrategia para la edificación sostenible no debería descuidar este aspecto, que supondría la **modificación de pautas y tendencias sociales**, que se podría articular a través de modificaciones en la fiscalidad de las viviendas.

Por último, para asegurar y mejorar la efectividad de todas las medidas propuestas, éstas deberían implementarse en el marco de una **estrategia general de decrecimiento sostenible**, de modo que se evitara cualquier posible efecto rebote, asegurando una reducción del consumo y, por tanto, de la explotación de recursos naturales. Para ello, entre otros aspectos, habría que establecer **moratorias a la construcción de nuevos edificios y grandes infraestructuras**, así como promover un **descenso poblacional**, incentivando la baja natalidad.

## 6.2. Contribuciones científicas de la tesis

---

Seguidamente se detallan las contribuciones científicas generadas en esta tesis:

1. Esta tesis ha proporcionado una **metodología de carácter cuantitativo, integradora y sistemática**, para el análisis y evaluación de los principales impactos energéticos y medioambientales asociados al ciclo de vida completo de los edificios; lo que supone un avance en el estado del arte, en el que abundan metodologías de carácter cualitativo con criterios de cálculo dispares. La metodología propuesta adapta los criterios generales ya establecidos en la normativa ISO 14.040:2006, ISO 14.044:2006, y diversos enfoques y aproximaciones del CEN/TC 350, así como esquemas de certificación medioambiental de edificios. Además la metodología está preparada para la evaluación de otros impactos que, aunque no se consideren en la actualidad, puedan alcanzar una mayor relevancia en los próximos años.
2. Se ha demostrado **que en nuevos edificios residenciales los impactos indirectos**, no contemplados en la actual normativa vigente, pueden llegar a suponer el **80% del impacto global**, tanto en energía primaria como en emisiones de dióxido de carbono, destacando en este sentido el **impacto de la movilidad** que supone el **56% del impacto global**. La aplicación de la metodología a los casos piloto seleccionados ha permitido establecer los materiales que más contribuyen a aumentar el impacto en los edificios.
3. Se ha realizado una evaluación cuantitativa del **potencial de ahorro a nivel nacional**, en términos de energía primaria y de disminución del calentamiento global potencial -en base a la metodología de ACV propuesta- así como de la inversión necesaria para la aplicación de un conjunto de **medidas de ecoeficiencia en edificios residenciales**, que incluyen la orientación de la fachada del edificio, el número de renovaciones-hora para ventilación, el equipamiento energético, la integración de energías renovables, el enfriamiento evaporativo, los acristalamientos diferenciados, la supresión de plantas subterráneas de garaje, la compacidad, el tamaño y el adosado de los edificios, el espesor de aislamiento óptimo, el uso de aislamientos naturales y materiales aligerados de menor impacto, las cubiertas vegetales, el uso de materiales locales y la disminución y mejora de la movilidad urbana. El potencial de ahorro obtenido asciende a **423.500 GWh/año**, evitando la emisión de **95.500 kt CO<sub>2</sub>-Eq/año**.
4. Se ha aplicado por primera vez el **modelo de curvas Ahorro-Inversión** para evaluar el potencial de disminución de los impactos en huella energética y de carbono del sector de la **edificación residencial en España**, produciéndose a igualdad de inversión, una **disminución de emisiones 9,4 veces mayor** a la considerada en el Plan de Acción 2008-2012 de la E4 para el sector de la edificación. Los resultados se han basado en la extrapolación de dos modelos de edificación residencial (vivienda unifamiliar y bloque de viviendas) y tres climatologías representativas de España (Burgos, Madrid y Sevilla),
5. Se ha realizado un análisis de sensibilidad del **criterio de ordenación de las medidas** incluidas en el modelo de curvas Ahorro-Inversión, comparando tres posibles criterios: de mayor a menor ahorro, de menor a mayor inversión y de **mayor a menor ratio de ahorro/inversión**, demostrando la idoneidad de este último criterio frente a otro tipo de planteamientos de las Administraciones.

Así, una inversión de 2.200 M€/año, priorizando adecuadamente las medidas, conlleva una disminución en emisiones un 48% superior con respecto a una priorización equivocada.

6. Se ha analizado la creciente evolución del coste de las emisiones evitadas en función del número de medidas implementadas, detectándose la **posibilidad de evitar** la emisión a nivel nacional de casi **56.000 ktCO<sub>2</sub>-Eq/año**, a un coste inferior a **15€ por tonelada** de CO<sub>2</sub> evitada.

7. Se ha demostrado la **gran sensibilidad** que presentan las **curvas Ahorro-Inversión** hacia las **medidas de carácter disruptivo**, cuya eliminación produce en las curvas una disminución del ahorro máximo de más del 40% y de la elasticidad de más del 84%.

8. Se han propuesto **procedimientos detallados de cálculo** y se han establecido las **fuentes de datos** necesarias para la **obtención de los inventarios de ciclo de vida** que permiten desarrollar un estudio completo de ACV en un edificio. En este sentido, cabe destacar los dos procedimientos básicos establecidos para la obtención del inventario de materiales de la envolvente de un edificio, en base al Proyecto Arquitectónico y los Planos del edificio, o bien, especialmente en caso de geometrías más complejas, a partir del presupuesto incluido en el Proyecto Básico y de Ejecución del edificio.

9. Con objeto de promover una **universalización en el uso del ACV** entre los agentes del sector, se ha propuesto una **simplificación metodológica** dirigida especialmente a edificios residenciales. Para ello, se ha analizado la relevancia e interrelación de cada una de las etapas consideradas en el ACV de un edificio, dejando fuera de los límites del sistema aquellas etapas menos significativas y aquellos aspectos menos relevantes dentro de cada etapa; estableciendo, al mismo tiempo, los indicadores medioambientales más adecuados para su valoración en edificios. Con ello, se reducen los datos y cálculos necesarios, disminuyendo el tiempo requerido para llevar a cabo el estudio.

10. Se ha propuesto y aplicado un **procedimiento** para el **cálculo del consumo de energía final en la iluminación interior de edificios residenciales**, a partir de los valores de iluminancia media mantenida exigidos por la normativa para cada estancia (lm/m<sup>2</sup>), la superficie de cada estancia (m<sup>2</sup>), la eficiencia lumínica de las lámparas instaladas (lm/W), y un valor por defecto establecido de horas de encendido según el tipo de estancia. El procedimiento propuesto se debería integrar con las herramientas nacionales de certificación de edificios residenciales, que actualmente no incluyen dicho consumo.

11. Se ha cuantificado el impacto, en términos de huella energética y de carbono, que puede tener un terreno con unas **características geotécnicas inadecuadas** sobre las etapas de producción y construcción del edificio, aumentando los requisitos estructurales, y por tanto, las necesidades de materiales del edificio y el peso de los materiales transportados. Edificar en un terreno de huerta con malas propiedades geotécnicas puede llegar a **incrementar la energía incorporada** por m<sup>2</sup> y año en los materiales del edificio hasta casi un 30%, además de la **destrucción del patrimonio histórico**, con el coste que ello supone.

12. Se ha desarrollado una **base de datos** que recoge los **impactos energéticos y medioambientales**, en términos de energía primaria incorporada, potencial de calentamiento global, huella hídrica y puntuación única, para los principales **materiales** y soluciones constructivas, adaptando diversos inventarios de ciclo de vida ya existentes a la realidad del sector en España. De este modo, todos los agentes del sector, y especialmente los diseñadores de edificios, pueden disponer de una fuente de datos que les permite seleccionar los materiales más adecuados y analizar de un modo más preciso las repercusiones de una correcta selección. Al mismo tiempo, se han analizado las **diferencias asociadas a la unidad funcional seleccionada**, evaluando el impacto por unidad de peso, por unidad de volumen y por metro cuadrado de solución constructiva que agregue diversos materiales proporcionando unas mismas características físicas y funcionales.

13. Se han **identificado las etapas más críticas del proceso productivo** de los **materiales**, y se ha propuesto y evaluado una **batería de medidas** y estrategias para la reducción de sus impactos del ciclo de vida en las distintas etapas (fabricación, transporte, construcción y disposición final), considerando las **Mejores Técnicas Disponibles** incluidas en los Documentos *BREF* existentes, y obteniendo, en los casos en que ha sido posible, una primera aproximación a las curvas Ahorro-Inversión de los sectores industriales (cerámico, aislamientos térmicos, cemento y madera) a los que pertenecen los materiales analizados.

14. Se han cuantificado los impactos en energía incorporada y potencial de calentamiento global asociados al **transporte de una tonelada por kilómetro** por medios terrestres, ferroviarios y marítimos, **desagregando el impacto** del desplazamiento propiamente dicho (que a excepción del transporte ferroviario supone más del 70% del impacto total), la fabricación y el mantenimiento de los medios utilizados (camión, locomotora y vagones, y barco), así como la fabricación y mantenimiento de las infraestructuras asociadas (carreteras, vías ferroviarias y puertos marítimos).

15. Se han cuantificado las necesidades de transporte de las materias primas de todos los materiales analizados (incluyendo el transporte por tubería de materias primas como el gas o el petróleo, ampliamente utilizadas en los materiales de la construcción) desde su extracción hasta la planta de producción. Igualmente se ha analizado el transporte de la planta a la obra, y de la obra hasta el punto de disposición final. Se ha estimado que en una vivienda unifamiliar tipo, la **repercusión total del transporte sobre el impacto de los materiales** asciende al 18,9% en el caso de la energía primaria y al 15,4% en el caso de las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub>.

16. Se ha realizado un análisis de sensibilidad del impacto de la **etapa de transporte** para los tres medios de transporte principales (terrestre, ferroviario y marítimo) estableciendo una **correlación lineal**, con sus correspondientes coeficientes, que depende de la distancia recorrida, de modo que se posibilita el cálculo del impacto en términos de energía incorporada, potencial de calentamiento global, huella hídrica y puntuación única, para cualquier combinación de transporte y distancia recorrida. A partir de dicha correlación, se deduce que las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> asociadas al ciclo de vida del transporte transoceánico (que ascienden a 1,1 kg CO<sub>2</sub>-Eq/100km) son 3,6 veces menores a las del transporte ferroviario, que a su vez son 5 veces menores a las del transporte por carretera.

17. Se ha hecho un **estudio de la evolución y situación actual del transporte de mercancías en España**, analizando el número de toneladas-kilómetro transportadas (que en los últimos diez años se ha triplicado), según destino, tipo de mercancía y modalidad de transporte, y estableciendo comparaciones con la situación en Europa. A partir de los datos anteriores recopilados se ha hecho una primera valoración del ahorro en energía primaria y emisiones de dióxido de carbono que se podría conseguir si se equilibrase el reparto modal, sustituyendo el transporte por carretera (que supone el 80% del total de toneladas-kilómetro) por el transporte ferroviario para trayectos de tipo medio-largo, mejorando las condiciones de intermodalidad y apostando por las redes malladas en detrimento de las redes radiales. Como resultado se ha obtenido un potencial de ahorro en energía primaria de 23.300 GWh/año, evitando la emisión anual de 6.700 MtCO<sub>2</sub>/año.

18. Como complemento de la metodología de ACV propuesta, cuyos límites del sistema son los propios edificios, se han desarrollado **estudios de ciclo de vida** relacionados con distintos aspectos de la **urbanización del territorio**, como las infraestructuras existentes alrededor de los edificios (calles, viales, aparcamientos, suministro de agua y energía), la movilidad de los ocupantes, y la artificialización del suelo. En todos estos casos se han comparado los impactos obtenidos con los de los propios edificios.

19. Se ha evaluado la **pérdida de productividad primaria neta potencial** asociada a la urbanización del territorio (1,9 kWh/m<sup>2</sup> año), calculando además el impacto energético (7,3 kWh/m<sup>2</sup> año) derivado de las necesidades de transporte inducidas al tener que transportar productos agrícolas desde distancias cada vez mayores, debido a la sustitución de superficie de huerta fértil por superficie urbanizada artificial.

20. Se ha evaluado una ratio promedio para la **huella energética** (1,6 kWh-Eq/m<sup>3</sup>) y la **puntuación única** (18,2 mPt/m<sup>3</sup>) del Ecoindicador 99 del **ciclo del agua**, desde su captación hasta los usuarios finales de un edificio tipo, desagregando el consumo de electricidad para bombeo y potabilización (que supone el mayor impacto con el 69% de la huella energética y el 57% de la puntuación única), los tratamientos químicos y de residuos, así como las infraestructuras necesarias, entre las que se encuentran las estaciones de bombeo, la planta de tratamiento, los depósitos de almacenamiento y las tuberías de la red de suministro.

21. Se han obtenido valores promedio por unidad de longitud de la huella energética y de carbono de las **redes para el suministro eléctrico y de gas a los edificios**. A modo de ejemplo, el valor obtenido de huella energética es de 126,5 kWh/m para la red de gas y de 65,9 kWh/m para la red eléctrica, incluyendo el impacto de las correspondientes estaciones eléctricas de conmutación media/baja tensión y otros equipamientos auxiliares necesarios. Dichos valores se han comparado con los correspondientes impactos del ciclo de vida completo de la electricidad y el gas, presentando en general una baja contribución (en torno al 5% o menos) debido a la larga vida útil de dichas infraestructuras.

22. Se han calculado ratios promedio por unidad de superficie para evaluar el **impacto** de la construcción de las **infraestructuras necesarias para el movimiento de vehículos (calzadas) y personas (aceras)**, que ascienden a 210 y 72,4 kg CO<sub>2</sub>-Eq/m<sup>2</sup> respectivamente. Además se han identificado los puntos críticos y se han evaluado posibles mejoras, como la sustitución de las calzadas de asfalto por hormigón, que permitiría obtener una reducción en las emisiones de 17 kg CO<sub>2</sub>-Eq/m<sup>2</sup>.

23. Se ha llevado a cabo una evaluación del **impacto del ciclo de vida** asociado a la **movilidad urbana** en los casos piloto analizados, así como una completa caracterización de la movilidad, por medio de una **encuesta** específicamente diseñada y dirigida hacia los usuarios de dichos edificios. Entre otros aspectos, se ha caracterizado la tipología y número de vehículos existentes en las viviendas, el número de trayectos, kilometraje y medios de transporte (públicos y privados) utilizados habitualmente para los desplazamientos desde sus domicilios hasta sus centros de trabajo y los centros comerciales y de ocio, así como el número de personas desplazadas habitualmente en el mismo vehículo. Asimismo se han evaluado diversas **opciones para la disminución de la movilidad urbana**, como el “*car sharing*”, el “*car pooling*”, el fomento del transporte público, y la vuelta a los modelos tradicionales de ciudad compacta y compleja, que permitiría evitar la emisión de 3,6 t CO<sub>2</sub>-Eq por vivienda y año.

24. Se ha llevado a cabo una **compilación y análisis** de los **modelos de certificación ambiental existentes** (*LEED*, *BREEAM*, *GBTool* y *CASBEE*), así como de los actuales estándares de edificación sostenible (Casas solares, *Net Zero Energy Buildings* y *Passive House*), **proponiendo un nuevo estándar de “Edificios de Cero Emisiones de Ciclo de Vida”**, adaptando la propuesta original de la Escuela Universitaria de Dublín, de modo que se puedan cubrir las deficiencias detectadas en los anteriores estándares.

25. Se ha **actualizado y ampliado el estado del arte**, ya compilado por otros autores, relativo a las **fuentes de datos, indicadores y metodologías de evaluación de impacto** del ciclo de vida. Se ha hecho una **crítica** sobre diversas hipótesis asumidas en el cálculo de algunos indicadores medioambientales comúnmente utilizados en los estudios de ACV, como las reservas consideradas en el indicador de “agotamiento de los recursos abióticos”, la distinción entre las distintas fuentes renovables en la “demanda de energía acumulada”, la contabilidad del dióxido de carbono de origen biogénico y la localización de las emisiones en el indicador de “potencial de calentamiento global”, etc.

26. Se han **analizado** las **herramientas de análisis de ciclo de vida disponibles**, tanto aquellas de uso más general (como *SimaPro* o *GaBi*), como aquellas más específicas para la evaluación ambiental de los edificios (*Ecoeffect*, *Equer*, *Legep*, *Envest*, *Athena*, *Bees*, etc.), comparando los distintos aspectos evaluados dentro de los límites del sistema, los criterios de cálculo e hipótesis de partida, las fuentes de datos utilizadas, los resultados obtenidos, etc.

27. Se han **recopilado y analizado** las principales **iniciativas y proyectos desarrollados sobre análisis de ciclo de vida en la edificación**, con especial énfasis en el ámbito europeo y nacional, entre los que cabe destacar, el proyecto *REGENER*, el Anexo 31 de la *AIE*, la “*Life Cycle Initiative*” de la *UNEP-SETAC*, la Red Temática Europea *PRESCO*, los proyectos *CALCAS*, *IMPRO-Building*, *ENSLIC*, *LoRe-LCA* y la *COST Action C25*.

28. Se ha presentado un exhaustivo **estado del arte** sobre los **estudios publicados** en revistas científicas internacionales y tesis doctorales relacionadas con la energía incorporada en los materiales de construcción, las ventajas del reciclaje de los materiales, las posibles simplificaciones aplicables a los estudios de ACV en edificios, los modelos de aplicación del ACV y los estudios de ACV realizados en distintos países sobre distintas tipologías de edificios, el impacto del ciclo de vida de los distintos tipos de estructura (principalmente acero, hormigón y madera) en los edificios, los estudios de ACV aplicados a los sistemas y equipos energéticos

instalados en edificios, el impacto del ciclo de vida de diversos materiales y soluciones constructivas (aislantes, cerámica estructural, revestimientos, materiales de cambio de fase, cubiertas vegetales y convencionales, etc.).

29. Se ha estudiado el **actual nivel de utilización** de la metodología del análisis de ciclo de vida, así como la percepción y el nivel de conocimiento de la metodología por parte de los principales agentes del **sector de la edificación español**. Asimismo se han identificado las universidades, grupos y centros de investigación nacionales con experiencia en ACV y edificación, los proyectos nacionales de I+D+i en marcha, los usuarios potenciales del ACV, las **oportunidades** asociadas a su uso, las diversas **barreras** y obstáculos existentes, y las **acciones** que habría que poner en marcha para superar dichas barreras y **conseguir una universalización** en el uso del ACV, como herramienta fundamental en la toma de decisiones y la definición de políticas y estrategias de sostenibilidad.

30. Se ha hecho una recopilación y un **análisis crítico de las iniciativas y marco regulador** relacionados con la **eficiencia energética edificatoria**, señalando sus aciertos y puntos más débiles. A nivel internacional, se han analizado el *Building Technologies Program*, la *Task 40-Solar Heating&Cooling Programm*, el *Annex 52-Energy conservation in Buildings and Community Systems Programme*, y el *Green/Sustainable Building Challenge*. Entre las iniciativas europeas, se han incluido la Directiva sobre Eficiencia Energética de Edificios 2002/91/CE y su refundición, la Directiva Marco sobre Residuos 2008/98/CE, la Iniciativa a favor de los Mercados Líderes de Europa y las Plataformas ECTP y E2B EI. Finalmente en España, se han estudiado, entre otros, el Plan de Acción 2008-2012 de la E4, la Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia 2007-2012-2020, el Código Técnico de la Edificación, el Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios, la Certificación Energética de Edificios, los Planes de Gestión de los Residuos de la Construcción y Demolición, y los Planes de Rehabilitación de Edificios y Viviendas.

31. Se ha descrito la **evolución y situación actual del sector de la edificación en España** recopilando un conjunto de distintas estadísticas e informes multidisciplinares ya existentes, con objeto de analizar los distintos indicadores del sector, como la tipología y número de edificios, su antigüedad, superficie construida, contribución al PIB, su consumo energético desagregado, la intensidad energética de los hogares, la huella ecológica de los núcleos urbanos, etc.



### 6.3.Perspectivas

---

Esta tesis ha abierto el camino para evaluar el impacto global real de la edificación en España, estableciendo las directrices básicas de una estrategia nacional de sostenibilidad en la edificación. A continuación se detallan las principales líneas de investigación que se abren con la finalización de esta tesis:

1. El ahorro potencial y la inversión necesaria de las distintas medidas propuestas se han cuantificado y extrapolado para la edificación residencial, por lo que queda pendiente su **cuantificación en el heterogéneo conjunto de edificios que componen el sector terciario**, cuya caracterización requiere de una amplia muestra de edificios con distintas funciones, usos y soluciones constructivas, de modo que sea posible hacer una adecuada extrapolación.

2. La **evaluación de las curvas Ahorro-Inversión** se ha basado en dos modelos de edificios residenciales y tres climatologías suficientemente representativas para garantizar una adecuada extrapolación. Sin embargo, con objeto de conseguir una evaluación más precisa, sería conveniente **ampliar el número de modelos de edificios considerados**, incluyendo otros posibles diseños y geometrías, así como ampliar el estudio a las 12 zonas climáticas consideradas en la normativa nacional vigente.

3. Se requiere realizar estudios de ACV en una muestra significativa de edificios terciarios de modo que sea posible analizar la relevancia de las etapas y aspectos considerados en el ACV de dichos edificios, y permita proponer diversas **simplificaciones metodológicas para las distintas tipologías de edificios terciarios**.

4. Debido a la controversia existente actualmente en la comunidad científica, es necesario **revisar las hipótesis de partida y cálculos asociados a los indicadores energéticos y ambientales utilizados** en el análisis de ciclo de vida, de modo que sea posible obtener una cuantificación de los distintos indicadores más precisa y más adaptada a las distintas zonas geográficas.

5. Se requieren **nuevas metodologías de evaluación del impacto del ciclo de vida** que además de incluir los habituales indicadores energéticos y ambientales, **ponderen otros parámetros económicos y sociales** (como la capacidad de creación de puestos de trabajo, la calidad del empleo, el nivel de desarrollo tecnológico y social, las condiciones laborales de los trabajadores, la ética del trabajo, etc.), que siendo **aspectos esenciales** del concepto de sostenibilidad, no son considerados actualmente en ninguna de las metodologías de evaluación de impacto existentes. Para ello, se deberían definir en primer lugar, los posibles indicadores económicos y sociales y su metodología de cálculo, y establecer seguidamente unos valores normalizados de referencia para distintas zonas geográficas, que deberían actualizarse periódicamente.

6. Se ha demostrado la necesidad de **establecer nuevos factores de paso adaptados a la realidad nacional y regional** para garantizar una adecuada conversión de la energía final a energía primaria y a emisiones de dióxido de carbono en los procedimientos de calificación energética de los edificios. Dichos factores de paso deberían considerar la eficiencia de toda la cadena de suministro energético y las infraestructuras asociadas en todo el ciclo de vida de cada fuente energética. Puesto que no genera el mismo impacto consumir 1 kWh eléctrico

durante un periodo determinado del día o del año, o hacerlo en regiones con una alta participación de las energías renovables en el mix o en regiones donde predominen las centrales de ciclo combinado, se requeriría hacer un **estudio de ACV desagregado** por zonas geográficas y periodos temporales sobre el actual **mix energético en España**, que permitiera establecer su impacto real.

7. Si bien la tesis proporciona una base de datos con el impacto energético y ambiental del ciclo de vida de los principales materiales y soluciones constructivas para cubiertas, fachadas, huecos y particiones interiores, se debería **ampliar el número de materiales y soluciones analizados**, de modo que sea posible cubrir cualquier combinación posible de materiales que pueda plantear el diseñador del edificio. A modo de ejemplo, en la tesis se evalúa el impacto del ciclo de vida de los ladrillos de arcilla aligerada que utilizan como aditivo una mezcla de trigo, cebada y centeno; quedando pendiente la evaluación de otros posibles aligerantes de tipo mineral u orgánico, como residuos de industrias papeleras, orujillo, serrín, poliestireno, coque, etc. Asimismo se ha demostrado que es necesario un **trabajo de campo en empresas fabricantes de productos** para los que no existen datos de inventario fiables, como es el caso de la lana de oveja utilizada como aislante térmico de edificios.

8. Debido a la imposibilidad de obtener datos con suficiente nivel de desagregación sobre el nivel de producción del sector maderero y de los distintos productos aislantes, las curvas Ahorro-Inversión obtenidas para los productos de estos sectores constituyen únicamente una estimación preliminar. Para mejorar la caracterización del Ahorro-Inversión sería necesario hacer un **estudio pormenorizado de cada sector, a partir de un muestreo significativo de empresas**.

9. Se requiere un esfuerzo investigador para **ampliar, adaptar y armonizar las bases de datos de inventario existentes para los materiales de construcción** a las características específicas de las industrias de la construcción en cada país. Para ello, hay que desarrollar a nivel europeo procedimientos armonizados para el desarrollo de sistemas de Declaraciones Medioambientales de Producto –DAP– y Reglas de Categoría de Productos –RCP–.

10. En esta tesis se han seleccionado edificios de bajo consumo energético para la identificación y evaluación comparativa de las etapas y aspectos de mayor impacto en los edificios desde una perspectiva global. Dicha selección se justifica en base a que la normativa vigente tiende a reducir cada vez más los consumos energéticos directos, por lo que resulta interesante vislumbrar qué impactos serán más representativos cuando los consumos directos de los edificios sean bajos. No obstante, podría ser interesante **realizar el mismo análisis para edificios construidos en el periodo 1960-70 no rehabilitados**, donde los impactos indirectos tendrán una menor repercusión sobre el impacto total.

11. **Ampliar el análisis a nivel de equipamiento desde la cuna hasta la puerta de fábrica de los sistemas energéticos**, de modo que además de considerar el impacto de los equipos de generación de calor/frío y equipos de aprovechamiento renovables, se evaluase también el impacto de los depósitos de almacenamiento térmico, las tuberías y sistemas de distribución, los sistemas de control y seguridad de las instalaciones, así como las estructuras de fijación necesarias para el montaje de todos los equipos anteriores.

12. **Realizar estudios de ciclo de vida que permitan establecer datos de inventario a nivel de equipamiento más precisos y diferenciados** para las distintas tipologías y tamaños de calderas (gas, gasóleo, etc.), equipos de aire acondicionado, bombas de calor, distintos tipos de lámparas (incandescentes, halógenos, fluorescentes, fluorescentes compactas y *LEDs*) y equipos auxiliares (balastos, reactancias, condensadores, reguladores de flujo, etc.).

13. Mejorar la precisión en la **evaluación de los impactos de los procesos on-site de construcción**, estableciendo unas ratios diferenciadas en función del tipo de obra, del terreno urbanizado y del propio edificio, para la evaluación del consumo de energía térmica y eléctrica necesaria durante la construcción del edificio, y para la determinación del volumen, tipología y destino final de los residuos de construcción y demolición generados en obra. Para ello se deberían **monitorizar y analizar una muestra significativa de obras**, de modo que fuera posible obtener unas ratios estándar que permitieran hacer una evaluación más precisa de cualquier tipo de obra.

14. **Ampliar el alcance del impacto del ciclo de vida** asociado a la **etapa de operación del edificio**, incluyendo los **bienes, productos y fungibles** adquiridos por los ocupantes del edificio, así como los **residuos** generados (cartón, vidrio, plásticos, orgánicos, etc.) en el edificio. Para obtener unas ratios estándar que permitieran incluir esta evaluación sería precisar hacer un estudio monitorizando y analizando una muestra significativa de edificios.

15. **Ampliar el alcance del impacto del ciclo de vida** asociado a la **etapa de mantenimiento del edificio**, incluyendo dentro del mantenimiento sustitutivo, además de las puertas y ventanas ya consideradas, otros materiales constructivos susceptibles de ser reemplazados a lo largo de la vida útil del edificio. Asimismo se podrían incluir dentro de esta evaluación las operaciones de limpieza y repintado de muros y tabiques del edificio, así como las posibles remodelaciones, reparaciones y una previsión de las posibles operaciones de mantenimiento correctivo necesarias para los sistemas energéticos y cerramientos del edificio.

16. **Considerar un enfoque dinámico en los estudios de ACV** que tengan en cuenta la degradación de las propiedades físicas de sus materiales constructivos (aislamientos térmicos, vidrios, carpintería, impermeabilizantes, etc.) y del rendimiento de los equipos energéticos (calderas, bombas de calor y equipos de aire acondicionado, captadores solares, etc.) con el paso de los años, y su posible modificación respecto a los valores iniciales al efectuar los correspondientes reemplazos de materiales y equipamientos a lo largo de la vida útil del edificio.

17. Promover la **I+D+i en la reutilización de materiales** como el hormigón armado, experimentando y desarrollando nuevas técnicas separación con objeto de facilitar la reutilización del árido y del acero en otros edificios u obras de ingeniería civil.

18. **Ampliar la escala espacial del ACV**, extendiendo los límites del sistema de los edificios a las **urbanizaciones**, para modelizar su impacto global analizando la influencia de los distintos parámetros que intervienen en el diseño y la planificación urbanística del territorio, como su localización, orientación de los viales y edificios, usos del suelo y zonas verdes, tamaño y tipología de edificios, infraestructuras de agua, energía y transporte (individuales o colectivas), interconexión con el resto del municipio, etc. Para ello, se deberían **crear modelos matemáticos** y obtener inventarios de ciclo de vida adaptados para los distintos

**procesos e infraestructuras de una urbanización**, incluyendo las principales alternativas planteables en el suministro de agua, electricidad y combustibles, la movilidad de los usuarios, el diseño urbanístico y el equipamiento de los edificios, así como la recogida y tratamiento de los vertidos y residuos generados. Como resultado de esta línea de trabajo, se podrían **establecer criterios científicos para el diseño y planificación de ecobarrios o ecociudades**. Posteriormente, los límites de los estudios de ACV podrían extenderse progresivamente a ciudades, regiones e incluso países enteros.

**19. Desarrollar y proponer una estrategia global de decrecimiento sostenible** capaz de integrar, complementar y mejorar los planes existentes y futuros de ahorro y eficiencia energética, mitigación del cambio climático, empleo, bienestar social, y lucha contra la pobreza y las desigualdades. Para ello se requeriría una modelización precisa de los efectos del decrecimiento en el ámbito social, económico, energético y medioambiental.

## REFERENCIAS

Abdelghani-Idrissi M.A., Birot J.-J., Seguin D., Miller A., Ip K. “*DURABUILD project: Environmental assessment tools report*”. 2004. <<http://www.durabuild.org/html/French/publications/EAT%20Report.pdf>>.

Adalberth K. “*Energy use during the life cycle of buildings: a method*”. *Building and Environment* 1997a;32:317–320.

Adalberth K. “*Energy use during the life cycle of single-unit dwellings: examples*”. *Building and Environment* 1997b;32:321–329.

Ad-hoc Industrial Advisory Group - E2B PPP. “*Research priorities for the definition of a Multiannual Roadmap and longer term Strategy*”. Noviembre 2009. <[http://www.e2b-ei.eu/e2bjti\\_documents.php](http://www.e2b-ei.eu/e2bjti_documents.php)>.

Albritton D.L., Meira-Filho L.G. “*Technical Summary in Climate Change 2001: The Scientific Basis - Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*”, IPCC, Cambridge University Press, 2001. <[http://www.grida.no/publications/other/ipcc\\_tar/](http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/)>.

Alonso y Asociados. (2008) “*Valorización de residuos en la industria cementera Europea*”. Edita: Fundación CEMA. <<http://www.fundacioncema.org>>.

Althaus H.J., Richter K. (2001) “*Life Cycle Analysis (LCA) of Different Cork Floorings*”. EMPA, Dübendorf.

Álvarez S. “*Análisis dinámico del comportamiento térmico de edificios*”. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla, 1986. <<https://www.educacion.es/teseo/mostrarRef.do?ref=39216>>.

Álvarez-Ude L. “*Edificación y desarrollo sostenible. GBC: un método para la evaluación ambiental de edificios*”. ISSN 0020-0883. *Informes de la construcción* 2003;55(486):63–69.

Anastaselos D., Giama E. Papadopoulos A.M. “*An assessment tool for the energy, economic and environmental evaluation of thermal insulation solutions*”. *Energy and Buildings* 2009;41(11):1165–1171.

Andrews E.S., et al. “*Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products*”. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative. ISBN: 978-92-807-3021-0. 2009. <[http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DITx1164xPA-guidelines\\_sLCA.pdf](http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DITx1164xPA-guidelines_sLCA.pdf)>.

Angelopoulou G.I., Koroneos C.J., Loizidou M. “*Environmental impacts from the construction and maintenance of a motorway in Greece*”. 1<sup>st</sup> International Exergy, Life Cycle Assessment, and Sustainability Workshop & Symposium ELCAS, 4–6 June, 2009, Nisyros, Greece.

Aranda A., Zabalza I., Martínez A., Valero A., Scarpellini S. “*El análisis de ciclo de vida como herramienta de gestión empresarial*”. ISBN: 84-96169-74-X. Fundación Confemetal, Madrid, 2006.

Aranda A., Zabalza I., Scarpellini S. “*Modelling of energy and environmental costs for sustainability of urban areas*”. Journal Thermal Science Special, 2005;9(3):25–37.

Aranda A. “*Modelos Energéticos Sostenibles para España. Perspectiva desde la Ecoeficiencia*”. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza-Departamento de Ingeniería Mecánica, 2009.  
<<https://www.educacion.es/teseo/mostrarRef.do?ref=603483>>.

Aranda A., Zabalza I., Llera E., Lemass O. “*Energy efficiency strategy for Spain: description of current framework and a complementary viewpoint*”. International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. 20<sup>th</sup> International Conference. Padova (Italy). 2007: 1595–1602.

Ardente F., Beccali G., Cellura M., Lo Brano V. “*Life cycle assessment of a solar thermal collector*”. Renew Energy 2005;30(7):1031–1054.

Ardente F., Beccali M., Cellura M., Mistretta M. “*Building energy performance: A LCA case study of kenaf-fibres insulation board*”. Energy and Buildings 2008;40:1–10.

Arenas F.J. “*El impacto ambiental en la construcción industrial, criterios para una construcción sostenible*”. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Educación a Distancia – Departamento de Ingeniería de Construcción y Fabricación, 2007.  
<<https://www.educacion.es/teseo/mostrarRef.do?ref=497826>>.

Arenas F.J. “*El impacto ambiental en la edificación. Criterios para una construcción sostenible*”. Edisofer, ISBN: 978-84-96261-36-5. Madrid, 2007.

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. “*ASHRAE handbook of fundamentals*”. Editor: Robert A. Parsons. ISBN: 0910110565; ISSN: 1041-2344. 1989.

ASI- American Sheep Industry Association (2006) “*Fast Facts... about sheep production in the United States*”. Extraído en 2007 de:  
<[http://www.sheepusa.org/?page=site/text&nav\\_id=06b30b9c925056e3635d644c8ae9a29b](http://www.sheepusa.org/?page=site/text&nav_id=06b30b9c925056e3635d644c8ae9a29b)>.

Asif M., Muneer T., Kelley R. “*Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland*”. Building and Environment 2007;42(3):1391–1394.

Assefaa G., Glaumann M., Malmqvist T., Eriksson O. “*Quality versus impact: Comparing the environmental efficiency of building properties using the EcoEffect tool*”. Building and Environment 2010;45(5):1095–1103.

Assefaa G., Glaumann M., Malmqvist T., Kindembe B., Hult M., Myhr U., Eriksson O. “*Environmental assessment of building properties—Where natural and social sciences meet: The case of EcoEffect*”. Building and Environment 2007;42(3):1458–1464.

Australian Government-Department of Environment and Heritage. “*Project Greening the building life cycle: Life cycle assessment tools in building and construction (Building LCA)*”. 2001. <<http://buildlca.rmit.edu.au>>.

AVNA - American Veterinary Naturopathic Association (2007). “*Forage Needs for Meat Goats and Sheep*”.

Ayuso A.M., Carvalho C., Cruz J.L., Delgado A., Landa L., López I., Prieto, F., Zamorano C. “*Sostenibilidad local: Una aproximación urbana y rural*”. Observatorio de la Sostenibilidad en España. 2008. <<http://www.sostenibilidad.es/Observatorio+Sostenibilidad/esp/servicios/publicaciones/informes/Indicador esSostenibilidadLocal.htm>>.

Baldasano J.M., Gonçalves M., Jiménez P. “*Estimación del consumo energético y de la emisión de CO<sub>2</sub> asociados a la producción, uso y disposición final de cables de PVC, XLPE y PE*”. Universitat Politècnica de Catalunya – Departament de Projectes d’Enginyeria. Informe: PVC-Cab-200511-2. Barcelona, 2005a.

Baldasano J.M., Gonçalves M., Jiménez P. “*Estimación del consumo energético y de la emisión de CO<sub>2</sub> asociados a la producción, uso y disposición final de láminas de PVC-P, EPDM y materiales bituminosos*”. Universitat Politècnica de Catalunya – Departament de Projectes d’Enginyeria. Barcelona, 2005b.

Baldasano J.M., Jiménez P., Gonçalves M., Parra R. “*Estimación del consumo energético y de la emisión de CO<sub>2</sub> asociados a la producción, uso y disposición final de tuberías de PVC, PEHD, PP, fundición y hormigón*”. Universitat Politècnica de Catalunya – Departament de Projectes d’Enginyeria. Informe: PVC-Tub-200512-2. Barcelona, 2005c.

Baldasano J.M., Parra R., Jiménez P. “*Estimación del consumo energético y de la emisión de CO<sub>2</sub> asociados a la producción, uso y disposición final de ventanas de PVC, aluminio y madera*”. Universitat Politècnica de Catalunya – Departament de Projectes d’Enginyeria. Informe: PVC-Ven-200501-2. Barcelona, 2005d.

Banco de España. “*Síntesis de indicadores. 1.6 Indicadores del mercado de la vivienda*”. Diciembre 2009. <<http://www.bde.es>>.

Barberán R., Arbués F., Domínguez F. “*Consumo y gravamen del agua para usos residenciales en la ciudad de Zaragoza: evaluación y propuesta de reforma*”. Edita: Zaragoza-Servicio de Cultura, 2007. ISBN: 84-8069-431-9.

Bare J.C., Gloria T., Norris G.A. “*Development of the Method and U.S. Normalization Database for Life Cycle Impact Assessment and Sustainability Metrics*”. Environmental Science Technology 2007;40(16):5108–5115.

Bare J.C., Norris G.A., Pennington D.W., McKone T. “*TRACI: The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts*”. Journal of Industrial Ecology 2003;6(3-4):49–78.

Bekker P.C.F. “*A life-cycle approach in building*”. Building and Environment 1982;17(1):55–61.

Besant R.W., Dumont R.S., Schoenau G. “*The Saskatchewan conservation house: some preliminary performance results*”. Energy and Buildings 1979;2(2):163–174.

Blengini G.A. “*Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: A case study in Turin, Italy*”. *Building and Environment* 2009;44:319–330.

Blengini G.A., Di Carlo T. “*The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings*”. *Energy and Buildings* 2010;42(6):869–880.

Bliss R.W. “*Design and performance of the nation’s only fully solar-heated house*”. *Air conditioning, Heating and Ventilating* 1955;52(10):92.

Boustead I. (1972) “*The milk bottle*”. Open University Press. Milton Keynes.

Boustead I. (1997) “*Eco-Profiles of the European Plastics Industry. Polyurethane Precursors (TDI, MDI, Polyols)*”. Report 9: 2nd edition. Association of Plastics Manufacturers in Europe (APME), Brussels. <<http://www.plasticseurope.org>>.

Boustead I. (2005) “*Eco-Profiles of the European Plastics Industry. Polyurethane rigid foam*”. PlasticsEurope, Brussels (Belgium). <<http://www.plasticseurope.org>>.

Boustead I. (2005) “*Eco-Profiles of the European Plastics Industry. Polyvinyl Chloride (PVC)*”. 3rd edition. PlasticsEurope, Brussels (Belgium). <<http://www.plasticseurope.org>>.

Boustead I. (2005-07) “*Electronic documents with the datasets from the PlasticsEurope Eco-Profiles*” - Calculation results from March 2005. Extraído en 2006 de: <<http://www.plasticseurope.org>>.

Boustead I. “*LCA - How it came about. The beginning in the U.K.*”. *International Journal of Life Cycle Assessment* 1996;1(3):147–150.

Boustead I., Hancock G.F. “*Handbook of Industrial Energy Analysis*”. Ellis Horwood Ltd. 1979.

Bovea M.D. “*Valoración de productos ecológicos. Aplicación al diseño de mobiliario de oficina*”. Tesis doctoral. Universitat Jaume I - Departamento de Tecnología, 2002. <<https://www.educacion.es/teseo/mostrarRef.do?ref=277215>>.

Brand G., Scheidegger A., Schwank O., Braunschweig A. (1998) “*Bewertung in Ökobilanzen mit der Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 1997*”. Schriftenreihe Umwelt 297. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL. Bern, Swiss.

Breto S., Turégano J.A., Uriel A. “*Energía solar y datos climáticos en Aragón: revisión y actualización para el diseño de instalaciones y edificios*”. Editado por Diputación General de Aragón - Departamento de Industria, Comercio y Turismo y Universidad de Zaragoza. ISBN: 978-84-8380-090-4. Zaragoza, 2008.

Brick K., Frostell B. “*A comparative study of two Swedish LCA-based tools for practical environmental evaluation of buildings*”. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management* 2007;9(3):319–39.

Brick K. “*Barriers for implementation of the Environmental Load Profile and other LCA-based tools*”. Licentiate thesis. Stockholm: KTH - Royal Institute of Technology, Industrial Ecology, 2008.



British Standards Institution - BSI Group. “PAS 2050:2008 – Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services”. 2008. <<http://shop.bsigroup.com/en/Browse-by-Sector/Energy--Utilities/PAS-2050>>.

Bruck M. (1996) “D-A-CH Bericht Schweiz, Backstein-Mauerwerk”. Verband Schweizerische Ziegelindustrie, Verband Österreichische Ziegelwerke, Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V., Zürich.

Buchanan A., Levine B. “Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions”. *Environmental Science and Policy* 1999;2:427–437.

Butti K., Perlin J. “A Golden Thread, 2500 Years of Solar Architecture and Technology”. Van Nostrand Reinhold Company. ISBN: 0442240058. 1980.

Cardim de Carvalho A. “Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento – Aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento”. Universitat Politècnica de Catalunya – Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, 2001.

CEN/TC 350. “prEN 15643-1, Sustainability of Construction Works – Assessment of Buildings – Part 1: General Framework”.

CEN/TC 350. “prEN 15643-2, Sustainability of Construction Works – Assessment of Buildings – Part 2: Framework for the Assessment of Environmental Performance”.

CEN/TC 350. “prEN 15643-3, Sustainability of Construction Works – Assessment of Buildings – Part 3: Framework for the Assessment of social Performance”.

CEN/TC 350. “prEN 15643-4, Sustainability of Construction Works – Assessment of Buildings – Part 4: Framework for the Assessment of economic Performance”.

CEN/TC 350. “prEN 15804:2008 Sustainability of Construction Works – Environmental product declarations – Product category rules”. Brussels, 2008.

CEN/TC 350/WG1 N075. “Sustainability of Construction Works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method”. Working draft. TC 350 WI 011:2008.

Ciroth A. “ICT for environment in life cycle applications openLCA — A new open source software for life cycle assessment”. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 2007;12(4):209-210.

Classen M., Althaus H.-J., Blaser S., Tuchschnid M., Jungbluth N., Doka G., Faist Emmenegger M., Scharnhorst W. (2007) “Life Cycle Inventories of Metals”. Final reportecoinvent data v2.0, nº 10. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.

Cole R.J., Kernan P.C. “Life-cycle energy use in office buildings”. *Building and Environment* 1996;31(4):307–317.

Comisión Europea. “*A European Strategic Energy Technology Plan (SET-PLAN) – Towards a low carbon future*”. COM(2007) 723 final. <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2007:0723:FIN:EN:PDF>>.

Comisión Europea - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability “*International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook*”, 2009. <<http://lct.jrc.ec.europa.eu/eplca/deliverables/consultation-on-international-reference-life-cycle-data-system-ilcd-handbook>>.

Comisión Europea. “*Communication from the Commission to the Council and the European Parliament on Integrated Product Policy. Building on Environmental Life-Cycle Thinking*”. Bruselas, (COM (2003) 302).

Comisión Europea. “*Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on the Sustainable Consumption and Production and Sustainable Industrial Policy Action Plan*”. Bruselas, (COM (2008) 397).

Comisión Europea. “*Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Taking sustainable use of resources forward: A Thematic Strategy on the prevention and recycling of waste*”. Bruselas, (COM (2005) 666).

Comisión Europea. “*Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Thematic Strategy on the sustainable use of natural resources*”. Bruselas, (COM (2005) 670).

Comisión Europea. “*Development of Horizontal Standardised Methods for the Assessment of the Integrated Environmental Performance of Buildings*”. M/350 EN, Standardisation Mandate to CEN, 29/03/04.

Comisión Europea. “*Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2002, relativa a la eficiencia energética de los edificios*”. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 2003. <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:001:0065:0071:ES:PDF>>

Comisión Europea. “*Directiva 2006/32/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de abril de 2006 sobre la eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos y por la que se deroga la Directiva 93/76/CEE del Consejo*”. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 2006. <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:114:0064:0064:es:pdf>>.

Comisión Europea. “*Directiva 2008/1/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de enero de 2008 relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación*”. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 2008. <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:024:0008:0029:es:pdf>>.

Comisión Europea. “*Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas*”. Diario Oficial de la Unión Europea, 2008. <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0030:es:pdf>>.

Comisión Europea. “Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición)”. Diario Oficial de la Unión Europea, 2010. <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:es:pdf>>.

Comisión Europea. “Directiva 89/106/CEE, de 21 de diciembre de 1988, relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados miembros sobre los productos de construcción”. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 1989. <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31989L0106:ES:HTML>>.

Comisión Europea. “Directiva 93/76/CEE del Consejo, de 13 de septiembre de 1993, relativa a la limitación de las emisiones de dióxido de carbono mediante la mejora de la eficacia energética (SAVE)”. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 1993. <<http://www.boe.es/doue/1993/237/L00028-00030.pdf>>.

Comisión Europea. “Directiva 96/61/CE del Consejo de 24 de septiembre de 1996 relativa a la Prevención y al Control Integrados de la Contaminación”. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 1996. <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/es/consleg/1996/L/01996L0061-20060224-es.pdf>>.

Comisión Europea. Comunicación de la Comisión. “Hacia un Plan Estratégico Europeo de Tecnología Energética”. Bruselas, 10/01/2007. COM (2006) 847 final.

Comisión Europea. Comunicación de la Comisión. “Iniciativa en favor de los Mercados Líderes de Europa”. Bruselas, 21/12/2007. COM (2007) 860 final.

Comisión Europea. Comunicación de la Comisión. “Un Plan Europeo de Recuperación Económica”. Bruselas, 26/11/2008. COM (2008) 800 final.

Comisión Europea. “Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel” 2001. <<http://eippcb.jrc.es>>.

Comisión Europea. “Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries” 2001. <<http://eippcb.jrc.es>>.

Comisión Europea. “Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency” 2009. <<http://eippcb.jrc.es>>.

Comisión Europea. “Reference Document on Best Available Techniques in the Ceramic Manufacturing Industry” 2007. <<http://eippcb.jrc.es>>.

Comisión Europea. “Reference Document on Best Available Techniques in the Production of Polymers” 2007. <<http://eippcb.jrc.es>>.

Comité Económico y Social Europeo. “Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se establecen condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción”. Bruselas, (COM (2008) 311 final). Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 2009. <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:C:2009:218:0015:0020:es:pdf>>.

Consejo de Ministros. “*Anteproyecto de Ley de Economía Sostenible*”. Madrid, 27/11/2009. <<http://www.economiasostenible.gob.es/ley-de-economia-sostenible>>.

Consellería de Medio Ambiente. “*Decreto 201/1994, de escombros y residuos de la construcción*”. DOGC nº 1931, 08/08/94.

Cordes R., Lampe M., Linde I., Martin K., Meyer G., Raab W., Schwieger H., Simons M., Kaczmarek T. (1996) “*Kalksandstein - Fakten zur Ökobilanz*”. Kalksandstein-Informationen GmbH+Co KG, Hannover. Extraído en 2003 de <[http://www.kalksandstein.de/cox\\_ksi](http://www.kalksandstein.de/cox_ksi)>

Crawley D.B., Lawrie L.K., Winkelmann F.C., Buhl W.F., Huang Y.J., Pedersen C.O., Strand R.K., Liesen R.J., Fisher D.E., Witte M.J., Glazer J. “*EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program*”. Energy and Buildings 2001;33(4):319–331.

Crouwel M. “*Green Architecture. 5 sustainable buildings*”. Atelier of the Chief Government Architect. June 2008.

Cuadrado J. “*Establecimiento de una metodología general para la medida de la sostenibilidad en el ciclo de vida de los edificios industriales*”. Tesis doctoral. Universidad del País Vasco – Departamento de Ingeniería Mecánica, 2009. <<https://www.educacion.es/teseo/mostrarRef.do?ref=565203>>.

Cuchí A., Wadel G., Lopez F., Sagrera A. (2007). “*Guía de la eficiencia energética para los administradores de fincas*”. Edita: Fundación Gas Natural, pp.10–11.

Cuchí A. “*Cambio Global España 2020/50 Sector edificación La imprescindible reconversión del sector frente al reto de la sostenibilidad*”. Edición Societat Orgánica. 2010. <<http://www.gbce.es>>.

Cuchí A., Pagès A. “*Sobre una estrategia para dirigir al sector de la edificación hacia la eficiencia en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI)*”. Ministerio de Vivienda. Madrid, Octubre 2007.

Cuchí A. “*Arquitectura*”. Proceedings Seminario herramientas informáticas asociadas al ACV. Universitat Autònoma de Barcelona, 18 de junio de 2008.

Chen T.Y., Burnett J, Chau C.K. “*Analysis of embodied energy use in the residential building of Hong Kong*”. Energy 2001;26:323–340.

De Gracia A., Rincón L., Castell A., Jiménez M., Boer D., Medrano M., Cabeza L.F. “*Life Cycle Assessment of the inclusion of phase change materials (PCM) in experimental buildings*”. Energy and Buildings 2010;42(9):1517–1523.

De Jong B. (1997). “*Glass*”. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. 5th edition CD-ROM Edition. Wiley & Sons, London.

De Luxán M., Vázquez M., Gómez G., Román E., Barbero M. “*Actuaciones con criterios de sostenibilidad en la rehabilitación de viviendas en el centro de Madrid*”. ISBN: 978-84-935719-8-6. Edita: Empresa Municipal de la Vivienda y Suelo (EMVS) Área de Gobierno de Urbanismo y Vivienda del Ayuntamiento de Madrid. 2009.

- De Meester B., Dewulfa J., Verbeke S., Janssens A., Van Langenhove H. "Exergetic life-cycle assessment (ELCA) for resource consumption evaluation in the built environment". *Building and Environment* 2009;44:11–17.
- De Oliveira M. A. (1991) "The Cork". Amorim, Porto.
- De Schryver A.M., Brakkee K.W., Goedkoop M.J., Huijbregts M.A.J. "Characterization Factors for Global Warming in Life Cycle Assessment Based on Damages to Humans and Ecosystems". *Environmental Science and Technology* 2009;43(6):1689–1695.
- Department for Communities and Local Government. "Definition of Zero Carbon Homes and Non-Domestic Buildings: Consultation". ISBN 978-1-4098-0934-0. United Kingdom. December 2008. <<http://www.communities.gov.uk/publications/planningandbuilding/zerocarbondedefinition>>.
- Dieterich D. (2000) "Polyurethanes". Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Sixth Edition, June-2001 Electronic Release (ed. Häussinger P., Leitgeb P. and Schmücker B.), 6th Electronic Release Edition. Wiley InterScience, New York.
- DIN-Deutsches Institut für Normung. "DIN 18960 User costs of buildings". 2008.
- DIN-Deutsches Institut für Normung. "DIN 276-1 Building costs - Part 1: Building construction". 2008.
- DIN-Deutsches Institut für Normung. "DIN 276-4 Building costs - Part 4: Civil constructions". 2009.
- Ding G.K.C. "Sustainable construction - The role of environmental assessment tools". *Journal of Environmental Management* 2008;86:451-464.
- Dixit M.K., Fernández-Solís J.L., Lavy S., Culp C.H. "Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review". *Energy and Buildings*, In Press, Corrected Proof, Available online 24 February 2010.
- Doka G. (2007). "Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services". Ecoinvent report n° 13, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland.
- Domouso F.J., Acha C. "Ciudad sostenible: el ciclo del agua". III Congreso de Ingeniería civil, Territorio y Medio Ambiente "Agua, Biodiversidad e Ingeniería" Zaragoza, 25-27 de octubre de 2006.
- Dones R., Bauer C., Bolliger R., Burger B., Faist Emmenegger M., Frischknecht R., Heck T., Jungbluth N., Röder A. (2007) "Life Cycle Inventories of Energy Systems: Results for Current Systems in Switzerland and other UCTE Countries". Final report ecoinvent data v2.0 n° 5". Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.

Dooley R., Leggett-Sikora J., Daquisto D., Nowak M. “*LCA Tools to measure environmental impacts: Assessing their applicability to the Home Building Industry*”. National Association of Home Builders Research Centre-NAHB. Final report, 2001. <[http://www.toolbase.org/PDF/CaseStudies/life\\_cycle\\_assessment\\_tools.pdf](http://www.toolbase.org/PDF/CaseStudies/life_cycle_assessment_tools.pdf)>.

Duffie J.A., Mitchell J.W. “*f-Chart: Predictions and Measurements*”. Journal of Solar Energy Engineering 1983;105:3-9.

EEA-European Environmental Agency (1999) “*Primary Copper Production (B336). IEMEP / CORINAIR Emission Inventory Guidebook*”. 3rd edition October 2002 Update Edition. European Environmental Agency. <[http://reports.eea.eu.int/technical\\_report\\_2001\\_3](http://reports.eea.eu.int/technical_report_2001_3)>.

Egenhofer C., Jansen J.C., Bakker S.J.A., Jussila J. “*Revisiting EU policy options for tackling climate change. A social cost-benefit analysis of GHG emissions reduction strategies*”. ISBN 978-92-9079-631-2. Centre for European Policy Studies. 2006. <<http://www.ceps.eu>>.

EPA-Environmental Protection Agency (1998) “*Brick and Structural Clay Product Manufacturing, Emissions Factor Documentation for AP-42, Final Report, Section 11.3*”. EPA Contract 68-D2-0159, Work Assignment nº I-0, MRI Project nº 4601-01. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Re-search Triangle Park/NC. <<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42>>.

Erlandsson M., Borg M. “*Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions and operation services—today practice and development needs*”. Building and Environment 2003;38:919–938.

Esbensen T.V., Korsgaard V. “*Dimensioning of the Solar Heating System in the Zero Energy House in Denmark*”. Solar Energy 1977;19(2):195–199.

Estevan A. “*Modelos de transporte y emisiones de CO<sub>2</sub> en España*”. ISSN 1696-0866. Revista de economía crítica 2005;4:67–87.

Estevan A., Sanz A. “*Hacia la reconversión ecológica del transporte en España*”. Bakeaz/Los Libros de la Catarata. ISBN: 84-8198-129-X. 1996.

European Construction Technology Platform – ECTP. “*Challenging and Changing Europe’s Built Environment A vision for a sustainable and competitive construction sector by 2030*”. February 2005.

European Construction Technology Platform – ECTP. “*Strategic Research Agenda for the European Construction Sector. Achieving a sustainable and competitive construction sector by 2030*”. December 2005. <<http://www.ectp.org/documentation.asp>>.

European Construction Technology Platform – ECTP. “*Strategic Research Agenda for the European Construction Sector. Implementation Action Plan*”. August 2007. <<http://www.ectp.org/documentation.asp>>.

Eyerer P., Reinhardt H.W. (2000) “*Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden: Wege zu einer ganzheitlichen Bilanzierung*”. Baupraxis. Birk-häuser Verl, Basel, Boston, Berlin.

- FAO. "Faostat Database Query". 2006. Extraído en 2006 de: <<http://faostat.fao.org/faostat>>.
- Feist W., Schnieders J., Dorer V., Haas A. "Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept". *Energy and Buildings* 2005;37(11):1186–1203.
- Fellows N. T., Pitfield D. E. "An economic and operational evaluation of urban car-sharing". *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 2000;5(1): 1-10.
- Fernández R., Carella A. "Conservación de energía en viviendas y edificios". Buenos Aires, CIRCA, 1981. <[http://www.arquinstal.com.ar/eficiencia/ure\\_esso/ure.html](http://www.arquinstal.com.ar/eficiencia/ure_esso/ure.html)>.
- Fleck B., Huot M. "Comparative life-cycle assessment of a small wind turbine for residential off-grid use". *Renewable Energy* 2009;34(12):2688–2696.
- Flumroc (2002) "Vierter Flumroc-Ökologiebericht". Flumroc AG, Flums (CH). <<http://www.flumroc.ch>>.
- Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Berntsen T., Betts R., Fahey D.W., Haywood J., Lean J., Lowe D.C., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G., Schulz M., Van Dorland R. "Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change". Editores: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. Intergovernmental Panel on Climate Change: Cambridge, U.K. and New York, 2007, 996 pp. <[http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_and\\_data.htm](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data.htm)>.
- Frankl P., Fullana P., Kreissig J. "Communication of life cycle information in the building and energy sectors". International Expert Workshop-Sector-specific approaches for Communication of Life Cycle Information to different stakeholders. Reviewed final draft. 2007.
- Franklin W., Hunt R. (1972). "Environmental impacts of poliestirene and molded pulp meat trays, a Summary", Mobil Chemical Company, Macedon, New York.
- Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Bauer C., Doka G., Dones R., Hirschler R., Hellweg S., Humbert S., Köllner T., Loerincik Y., Margni M., Nemecek T. (2007) "Implementation of Life Cycle Assessment Methods". Ecoinvent report n° 3, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 151 p.
- Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Doka G., Heck T., Hellweg S., Hirschler R., Nemecek T., Rebitzer G., Spielmann M. (2004) "Overview and Methodology". Ecoinvent report n° 1, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 75 p.
- Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.J., Doka G., Dones R., Heck T., et al. "The ecoinvent database: overview and methodological framework". *International Journal of Life Cycle Assessment* 2005;10(1):3–9.

Frischknecht R., Rebitzer G. “*The ecoinvent database system: a comprehensive web-based LCA database*”. *Journal of Cleaner Production* 2005;13(13–14):1337–1343.

Frischknecht R., et al, “*Ökoinventare für energie systeme*”, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, ENET Publications, Bern 1996.

Fullana P., Puig R. (1997) “*Análisis del Ciclo de Vida*”. Cuadernos de Medio Ambiente. Ed. Rubens.

Fullana P., Rieradevall J. “*Análisis de Ciclo de Vida del Producto – ACV (I)*”. *Innovación Química* 1995;9:41–44.

Fundación Ecología y Desarrollo. “*La Ecoauditoría del Agua en la Industria. Guía Práctica*”. Edita: Fundación Ecología y Desarrollo. ISBN: X-00156178. 2003.

Fussler C., James P. (1996). “*Driving Eco-Innovation: a breakthrough discipline for innovation and sustainability*”. Pitman Publishing, London.

Galán I. “*Estudio de investigación para la cuantificación del secuestro de CO<sub>2</sub> de materiales en base a cemento*”. Presentado en la Jornada “Estudio del efecto sumidero de CO<sub>2</sub> de los materiales de base cemento”. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Madrid, 2009.

García Casals X. “*Analysis of building energy regulation and certification in Europe: Their role, limitations and differences*”. *Energy and Buildings* 2006;38:381–392.

García H., Llabrés F., Domínguez E., Artigas R., Raya F., Sierra F., Ros J.L. “*Porcelanico Bionictile®: reducción selectiva de NOx ambiental con productos cerámicos esmaltados aditivados con una composición conteniendo dióxido de titanio y potenciadores*”. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio* 2009;48(2):91-94.

García-Valverde R., Miguel C., Martínez-Béjar R., Urbina A. “*Life cycle assessment study of a 4.2 kWp stand-alone photovoltaic system*”. *Solar Energy* 2009;83(9):1434–1445.

Gaviria M. “*La competencia Rural-Urbana por el uso de la tierra*”. ISSN 0211-8394. *Agricultura y sociedad* 1978;7:245–261.

Gazulla C. “*Análisis de Ciclo de Vida de cuatro sistemas de rehabilitación de cubiertas*”. Resumen del trabajo de investigación del doctorado en Ciencias Ambientales. 2005.

Geddes P. “*Cities in Evolution. An introduction to the town planning movement and to the study of civics*”. Williams & Norgate. London. 1915.

Generalitat de Catalunya – Departamento de la Presidencia. “*Decreto 21/2006, de 14 de febrero, por el que se regula la adopción de criterios ambientales y de ecoeficiencia en los edificios*”. (Corrección de erratas en el DOGC nº 4678, pág. 31460, de 18/07/2006). (Pág. 7567) *Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya*. DOGC nº 4574 - 16/02/2006.



- Getter K.L., Rowe D.B., Robertson G.P., Cregg B.M., Andresen J.A. “*Carbon Sequestration Potential of Extensive Green Roofs*”. Environmental Science and Technology 2009;43(19):7564–70.
- Gilabert A.M. “*Aproximación medioambiental al inventario del ciclo de vida de la baldosa de Castellón*”. Tesis doctoral. Universitat de València – Departamento de Economía Aplicada, 2007. <<https://www.educacion.es/teseo/mostrarRef.do?ref=411264>>.
- Glaumann M., Malmquist T., Scarpellini S., Peupartier B., Krigsvol G., Wetzel C., Staller H., Horváth S., Szalay Z., Degiovanni V., Stoykova E. “*Guidelines for LCA calculations in early design phases*”. ENSLIC Workpackage 3: Final report, 2009. <[www.enslic.eu](http://www.enslic.eu)>.
- Gluch P., Baumann H. “*The life cycle costing (LCC) approach: a conceptual discussion of its usefulness for environmental decision-making*”. Building and Environment 2004;39(5):571-580.
- Gobierno Vasco. “*Guía de Edificación Sostenible para la vivienda en la Comunidad Autónoma del País Vasco*”. Elaborada por EVE, IHOBE, ORUBIDE y VISESA en colaboración con LABEIN. 2006. <<http://www.gizaetxe.ejgv.euskadi.net>>.
- Goedkoop M., Spriensma R. (2000) “*The Eco-indicator 99: A damage oriented method for life cycle impact assessment*”. PRé Consultants, Amersfoort, The Netherlands. <<http://www.pre.nl/eco-indicator99>>
- Goggins J., Keane T., Kelly A. “*The assessment of embodied energy in typical reinforced concrete building structures in Ireland*”. Energy and Buildings 2010;42(5):735–744.
- Goverse T. “*Wood innovation in the residential construction sector; opportunities and constraints resources*”. Conservation and Recycling 2001;34:53–74.
- Graedel T. “*Industrial Ecology – Definition and Implementation*”. Industrial Ecology and Global Change. Cambridge University Press, New York, Chapter 3, 1994.
- Guaita N., Landa L., Álvarez-Uría P., De la Cruz J.L., López I., Ochoa J.C., Ayuso A., Jiménez L.M., Delgado A., Zamorano C., De Carvalho C., Bajo J., Del Val V. “*Informe Anual de Sostenibilidad en España 2009*”. Observatorio de la Sostenibilidad en España. 2009. <<http://www.sostenibilidad-es.org>>.
- Guinée J.B., Gorée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., de Koning A., et al. “*Life cycle assessment-An operational guide to the ISO standards - Parts 1, 2 and 3*”. Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), 2001. <<http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/projects/lca2/lca2.html>>.
- Gustavsson L., Joelsson A. “*Life cycle primary energy analysis of residential buildings*”. Energy and Buildings 2010;42(2): 210–220.

Gustavsson L., Joelsson A., Sathre R. "Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building". *Energy and Buildings* 2010;42(2):230–242.

Gustavsson L., Pingoud K., Sathre R. "Carbon dioxide balance of wood substitution: comparing concrete- and wood-framed buildings". *Mitigation and Adaptation. Strategies for Global Change* 2006;11:667–691.

Haapio A., Viitaniemi P. "A critical review of building environmental assessment tools". *Environmental Impact Assessment Review* 2008;28:469–482.

Habert G., Billard C., Rossi P., Chen C., Roussel N. "Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives". *Cement and Concrete Research* 2010;40(5):820–826.

Häkkinen T., Tattari K., Vares S., Laitinen A., Hyvärinen J. "Methodology for Compiling Environmental Declarations for Building Products and Assessing Environmental Impacts of Buildings". Confederation of Finnish Construction Industries RT. 2006. <<http://virtual.vtt.fi/virtual/proj6/environ/eka-report-2006.pdf>>.

Hannon B., Stein R.G., Segal B.Z., Serber D. "Energy and labor in the construction sector". *Science* 1978;202(4370):837–847.

Hauck D., Hilker E., Hesse E. (1997) "Bricks and structural tiles". Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry (ed. Anonymous). 5th edition CD-ROM Edition, Berlin.

Hauschild M., Goedkoop M., Guinée J.B., Heijungs R., Huijbregts M., Joliet O., Margni M., Schryver A.D. "Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment (LCA)". International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Background Document. Draft for public consultation. June 2009.

Hauschild M., Potting J. "Background for spatial differentiation in LCA impact assessment: The EDIP03 methodology". Institute for Product Development Technical University of Denmark. Environmental Project n°996, Denmark, 2005.

Hauschild M., Wenzel H. "Environmental Assessment of Products. Volume II - Scientific background". First Edition. Chapman & Hall, London (UK), Weinheim (Germany), New York (USA), Tokyo (Japan), Melbourne (Australia), Madras (India). 1998.

Hayashi K., Itsubo N., Inaba A. "Development of Damage Function for Stratospheric Ozone Layer Depletion - A Tool Towards the Improvement of the Quality of Life Cycle Impact Assessment". *International Journal of Life Cycle Assessment* 2000;5(5):265–272.

Hayashi K., Nakagawa A., Itsubo N., Inaba A. "Expanded Damage Function of Stratospheric Ozone Depletion to Cover Major Endpoints Regarding Life Cycle Impact Assessment". *International Journal of Life Cycle Assessment* 2006;11(3):150–161.

- Hayashi K., Okazaki M., Itsubo N., Inaba A. "Development of Damage Function of Acidification for Terrestrial Ecosystems Based on the Effect of Aluminum Toxicity on Net Primary Production". *International Journal of Life Cycle Assessment* 2004;9(1):13–22.
- Heijungs R., Huppes G., Guinée J.B. "Life cycle assessment and sustainability analysis of products, materials and technologies. Toward a scientific framework for sustainability life cycle analysis". *Polymer Degradation and Stability* 2010;95(3):422–428.
- Hernández M.A. "Modelo de evaluación de la demanda energética en la planificación urbanística. Aplicación al estudio de Parque Goya". Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza-Departamento de Ingeniería Mecánica, 2008. <<http://www.educacion.es/teseo/mostrarResult.do?ref=565083>>.
- Hernández M.A., Pericás J.C., García F., Monné C., Turégano J.A. "Optimización energética de edificios: Aplicación MEDEA". *Actas del IX Congreso Ibérico de Energía Solar sobre Energías Renovables y Desarrollo Sostenible*, 2000. pp 585-590.
- Hernández P., Jiménez D., Nieto J. "Plan de Rehabilitación de Edificios 2009-2012". Borrador 2008. <<http://www.sostenibilidad-es.org>>.
- Hernandez P., Kenny P. "From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB)". *Energy and Buildings* 2010;42:815–821.
- Hischier R. (2007) "Life Cycle Inventories of Packaging and Graphical Paper". Final report ecoinvent Data v2.0 n° 11. EMPA St. Gallen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.
- Huberman N., Pearlmutter D. "A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert". *Energy and Buildings* 2008;40:837-48.
- Hudson L.K., Misra C., Wefers K. (1997) "Aluminium Oxide". *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*. 5th edition CD-ROM Edition. Wiley & Sons, London.
- Huijbregts M.A.J., Rombouts L.J.A., Ragas A.M.J., Van de Meent D. "Human-toxicological effect and damage factors of carcinogenic and non-carcinogenic chemicals for life cycle impact assessment". *Integrated Environmental Assessment and Management* 2005b;1(3):181–244.
- Huijbregts M.A.J., Struijs J., Goedkoop M., Heijungs R., Hendriks A.J., Van de Meent D. "Human population intake fractions and environmental fate factors of toxic pollutants in Life Cycle Impact Assessment". *Chemosphere* 2005a;61(10):1495–1504.
- Hunt R., Franklin W. (1974). "Resources and environmental profile analysis of nine beverage container alternatives". U.S. Environmental Protection Agency. EPA Report 530/SW-91c, NTIS n° PB 253486/5wp.
- Hunt R., Franklin W. "Environmental effects of recycling paper". American Institute of Chemical Engineers, New York. *Forest Products and the Environment* 1973;69(133):67–78.

- Huovila P., Ala-Juusela M., Melchert L., Pouffary S. “*Buildings and Climate Change. Status, Challenges and Opportunities*”. United Nations Environment Programme. ISBN: 978-92-807-2795-1. 2007. <[http://www.unep.fr/pc/sbc/documents/Buildings\\_and\\_climate\\_change.pdf](http://www.unep.fr/pc/sbc/documents/Buildings_and_climate_change.pdf)>.
- Huwer U. “*Public transport and car-sharing—benefits and effects of combined services*”. *Transport Policy* 2004;11(1):77–87.
- Ibañez M., Rosell J.R., Rosell J.I. “*Tecnología solar*”. Universitat de Lleida. ISBN: 84-8476-199-1. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 2005.
- IDAE. Ministerio de Industria Turismo y Comercio. “*Plan de Energías Renovables 2005-2010*”. Madrid, Agosto 2005. <<http://www.idae.es>>.
- IDAE. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. “*Estrategia Española de Ahorro y Eficiencia Energética en España (E4) 2004-2012*”. Madrid, Noviembre 2003. <<http://www.idae.es>>.
- IDAE. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. “*Plan de Acción 2005-2007 de la E4*”. Madrid, Julio 2005. <<http://www.idae.es>>.
- IDAE. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. “*Plan de Acción 2008-2012 de la E4*”. Madrid, Julio 2007. <<http://www.idae.es>>.
- Ilomäki A. “*How will CEN TCs proceed?*” CEN/TC 350 (on Basic Works Requirement 7) CEN Construction Sector Network Conference: Construction Standards: 2010-2015. Milan. 2009. <<http://www.cen.eu/CENORM/Sectors/sectors/construction/events/session422tc350ai.pdf>>.
- INE- Instituto Nacional de Estadística. “*Censo de Población y Viviendas 2001. Resultados detallados definitivos*”. Madrid, 2004. <<http://www.ine.es>>
- INE- Instituto Nacional de Estadística. “*Cifras de población. Series históricas de población*”. Diciembre 2009. <<http://www.ine.es>>.
- Instituto Cerdá. “*Reciclado y valorización de residuos en la industria cementera en España*”. Edita Fundación CEMA. 2009. <<http://www.fundacioncema.org>>.
- Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción, CEPSCO, AICIA “*Catálogo de Elementos Constructivos del Código Técnico de la Construcción (CTE)*”. Versión preliminar, Mayo 2008. <[http://www.codigotecnico.org/fileadmin/Ficheros\\_CTE/Documentos/CTEFeb08/CAT-EC-v05.0\\_MAYO08.pdf](http://www.codigotecnico.org/fileadmin/Ficheros_CTE/Documentos/CTEFeb08/CAT-EC-v05.0_MAYO08.pdf)>.
- International Iron and Steel Institute - IISI (2002) “*Steel Statistical Yearbook 2002*”. <<http://www.worldsteel.org>>.
- IPCC-Intergovernmental Panel of Climate Change. (2007). IPCC/TEAP Special Report: “*Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System. Chapter 7 Foams*”. <<http://www.ipcc.ch>>.

IPPC-Integrated Pollution Prevention and Control. (2000) *“Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel”*. European Commission. <<http://www.jrc.es/pub/english.cgi/0/733169>>.

IPPC-Integrated Pollution Prevention and Control. (2001). *“Reference Document on Best Available Techniques in the Glass Manufacturing Industry”*. Extraído en 2003 de: <<http://www.jrc.es/pub/english.cgi/0/733169>>.

ISO 21930:2007 *“Sustainability in building construction – Environmental declaration of building products”*. ISO, Ginebra, 2007.

ISO/TS 14048:2002 *“Norma sobre Gestión Ambiental – Análisis de Ciclo de Vida – Normalización de datos e información para una evaluación de ciclo de vida”*. 2002.

Itsubo N., Sakagami M., Washida T., Kokubu K., Inaba A. *“Weighting Across Safeguard Subjects for LCIA through the Application of Conjoint Analysis”*. International Journal of Life Cycle Assessment 2004;9(3):196–2005.

James D.H., Castor W.M. (2000) *“Styrene”*. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Sixth Edition, June-2001 Electronic Release (ed. Häussinger P., Leitgeb P. and Schmücker B.), 6th Electronic Release Edition. Wiley InterScience, New York. <<http://www.mrw.interscience.wiley.com/ueic>>.

Janssen G.M.T., Hendriks Ch.F. (2002). *“Sustainable use of recycled materials in building construction”*. Advances in Building Technology. pp.1399–1406.

Jefatura del Estado. *“Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero”*. BOE nº 59, de 10/03/2005. <<http://www.mma.es>>.

Jefatura del Estado. *“Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación”*. BOE nº 266 del 06/11/1999: 38925-38934.

Jefatura del Estado. *“Real Decreto-ley 6/2010, de 9 de abril, de medidas para el impulso de la recuperación económica y el empleo”*. BOE nº 89, de 13/04/2010. <<http://www.boe.es/boe/dias/2010/04/13/pdfs/BOE-A-2010-5879.pdf>>.

Johnsen K., Grau K. *“TSBI3 Computer program for thermal simulation of buildings User's Guide (Version B08)”*. SBI Danish building research Institute, 1994.

Johnson T. *“Comparison of Environmental Impacts of Steel and Concrete as Building Materials Using the Life Cycle Assessment Method”*. Master of Science in Civil and Environmental Engineering at the Massachusetts Institute of Technology, 2006. <<http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/34608?show=full>>.

Jolliet O., Margni M., Charles R., Humbert S., Payet J., Rebitzer G., Rosenbaum R. *“IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology”*. International Journal of Life Cycle Assessment 2003;8(6):324–330.

Jönsson Å. *“Tools and methods for environmental assessment of building products—methodological analysis of six selected approaches”*. Building and Environment 2000;35:223–238.

- Junnila S. “*The environmental impact of an office building throughout its life cycle*”. Helsinki University of Technology Construction Economics and Management. Doctoral Thesis. ISBN 951-22-7284-9. Finland, 2004. <<http://lib.tkk.fi/Diss/2004/isbn9512272857>>.
- Kasser U., Pöll M. (1998) “*Graue Energie von Baustoffen; Daten zu Baustoffen, Bauchemikalien, Verarbeitungs- und Transportprozessen mit Erläuterungen und Empfehlungen für die Baupraxis*”. 2. vollständig neu überarbeitete Aufl. Edition. Büro für Umweltchemie, Zürich.
- Kats G.H. “*The costs and financial benefits of Green Building*”. Report to California’s Sustainable Building Task Force. USA, 2003.
- Kellenberger D., Althaus H.J. “*Relevance of simplifications in LCA of building components*”. Building and Environment 2009;44:818–825.
- Kellenberger D., Althaus H.J., Jungbluth N., Künniger T., Lehmann M., Thalmann P. (2007) “*Life Cycle Inventories of Building Products*”. Final reportecoinvent Data v2.0 n° 7. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.
- Kemna R., Van Elburg M., Li W., Van Holstein R. (2005). “*MEEuP – The methodology Report*”. EC, Brussels. Final version, Delft 28-11-2005.
- Khazzoom J.D. “*Economic implications of mandated efficiency in standards for household appliances*”. Energy Journal, 1980;1(4):21-40 (citado en Aranda A, 2009).
- Klein S.A., Beckman W.A., Duffie J.A. “*A design procedure for solar heating systems*”. Solar Energy 1976;18:113–127.
- Klöpffer W. “*Life cycle sustainability assessment of products*”. International Journal of Life Cycle Assessment 2008;13(2):89–94.
- Kohler N., Wagner A., Luetzkendorf T., König H. “*Life cycle assessment of passive buildings with LEGEP® — a LCA tool from Germany*”. 2005 <[http://www.legep.de/download/Germany\\_SB05\\_LEGEP\\_Report.pdf](http://www.legep.de/download/Germany_SB05_LEGEP_Report.pdf)>.
- Koroneos C., Dompros A. “*Environmental assessment of brick production in Greece*”. Building and Environment 2007;42:2114–2123.
- Koroneos C., Kottas G. “*Energy consumption modeling analysis and environmental impact assessment of model house in Thessaloniki—Greece*”. Building and Environment 2007;42:122–138.
- Kotaji S, Edwards S, Schuurmans A. “*Life cycle assessment in building and construction. A state-of-the-art report*”. SETAC press, 2003.
- Krauss U, Wagner H, Mori G. (1999) “*Stoffmengenflüsse und Energiebedarf bei der Gewinnung ausgewählter mineralischer Rohstoffe; Teilstudie Kupfer*”. Geologisches Jahrbuch, Vol. Sonderhefte SH 9. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover. ISBN 3-510-95831-4.

- Krayenhoff S., Bass B. *“The Impact of Green Roofs on the Urban Heat Island: A Toronto case study”*. Report to the National Research Council, Institute for Research in Construction. Ottawa, ON, 2003.
- Kubba S. *“LEED Practices, Certification, and Accreditation Handbook”*. Publisher Butterworth-Heinemann. ISBN: 978-1856176910. 2009.
- Kündig R., Mumenthaler T., Eckardt P., Keusen H.R., Schindler C., Hofmann F., Vogler R., Guntli P. (1997) *“Die mineralischen Rohstoffe der Schweiz”*. Schweizerische Geotechnische Kommission, Zürich.
- Künniger T., Werner F., Richter K. (2001) *“Ökologische Bewertung von Kies, Zement und Beton in der Schweiz”*. Schweizerische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), Dübendorf.
- Langdon D. *“Life cycle costing (LCC) as a contribution to sustainable construction – Guidance on the use of the LCC Methodology and its application in public procurement”*. David Langdon, Management Consulting. May 2007.
- Lee K., Tae S., Shin S. *“Development of a Life Cycle Assessment Program for building (SUSB-LCA) in South Korea”*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009;13(8):1994–2002.
- Li X., Zhu Y., Zhang Z. *“An LCA-based environmental impact assessment model for construction processes”*. Building and Environment 2010;45:766–775.
- Li Z. *“A new life cycle impact assessment approach for buildings”*. Building and Environment 2006;41:1414–1422.
- Lizárraga C. *“Movilidad urbana sostenible: un reto para las ciudades del siglo XXI”*. Economía, Sociedad y Territorio 2006;VI(22):283–321.
- Locher F.W., Kropp J. (1997) *“Cement and Concrete”*. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry (ed. Anonymous). 5th edition CD-ROM Edition. Wiley & Sons, London.
- López F. *“Sobre el uso y la gestión como los factores principales que determinan el consumo de energía en la edificación. Una aportación para reducir el impacto ambiental de los edificios”*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya-Departament de Construccions Arquitectòniques, 2006. <<http://www.tesisenred.net/TDX-0112107-140436>>.
- López V.M. *“Desarrollo Sostenible. Aproximación conceptual y operativa de los principios de Sostenibilidad al Sector de la Construcción”*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya - Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, 2001. <<http://www.tesisenred.net/TDX-0626101-135226>>.
- Llera E., Aranda A., Zabalza I., Scarpellini S. *“Local impact of renewables on employment: Assessment methodology and case study”*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2010;14(2):679–690.

Macías M., Alvarez-Ude L., Rivas P., Rachmat R. “*VERDE, Comparative assessment for evaluating the environmental performance of buildings*”. Proceedings World Sustainable Building. Tokio. 2005.

Macías M., et al. “*Comparativa de resultados de demanda y consumo energético de un edificio proporcionados por diferentes programas de simulación energética con respecto a los programas LIDER y CALENER*”. Foro de simulación energética en edificios. Universidad Politécnica de Madrid. 2005.

Macías M., et al. “*SBTool-VERDE. Assessment of residential and office buildings*”. Proceedings World Sustainable Building Conference. Melbourne. 2008.

Macías M., García J. “*Metodología y herramienta VERDE para la evaluación de la sostenibilidad en edificios*”. ISSN: 0020-0883. Informes de la Construcción 2010;62(517):87–100.

Malmqvist T., Glaumann M., Scarpellini S., Zabalza I., Aranda A., Llera E., Díaz S. “*Life cycle assessment in buildings: The ENSLIC simplified method and guidelines*”. Energy, In Press, corrected proof available online 17 April 2010.

Marti i Ragué X. (2003) “*Edificación sostenible*”. Desarrollo Sostenible en España. CONAMA. pp:183–191. <[www.conama.es/viconama/ds/pdf/43.pdf](http://www.conama.es/viconama/ds/pdf/43.pdf)>.

Martínez A. “*Exergy Cost Assessment of water resources: Physical Hidromomics*”. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza-Departamento de Ingeniería Mecánica, 2009. <<https://www.educacion.es/teseo/mostrarRef.do?ref=853392>>.

Matasci C. “*Life Cycle Assessment of 21 buildings- analysis of the different life phases and highlighting of the main causes of their impact on the environment*”. Master Theses. Master en sciences naturelles de l’environnement. Université de Genève and Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2006. <<http://e-collection.ethbib.ethz.ch/view/eth:30551>>.

Mauch S., von Stokar T., Zürcher D., Heldstab J., Schreyer C., Seiler B., Scheidegger A., Zanola V., Tschirren J. (1995) “*Quantitative Aspekte einer zukunftsfähigen*”. Schweiz Arbeitsbericht. INFRAS, Zürich.

Maul J. (2000) “*Polystyrene and Styrene Copolymers*”. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Sixth Edition, June-2001 Electronic Release (ed. Häussinger P., Leitgeb P. and Schmücker B.), 6th Electronic Release Edition. Wiley InterScience, New York. <<http://www.mrw.interscience.wiley.com/ueic>>.

Mazria E. “*El libro de la Energía Solar Pasiva*”. Tecnología y Arquitectura. ISBN: 9686085769. México, 1979.

Meadows D.L., Meadows D.H., Randers J., Behrens W. “*The limits to growth*”. Universe Books. ISBN: 0876631650. USA, 1972.

Mendoza E.M. “*Aportaciones metodológicas e instrumentales al establecimiento y cálculo del análisis de ciclo de vida de materiales*”. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya – Departament de Projectes d’Enginyeria, 2001. <<https://www.educacion.es/teseo/mostrarRef.do?ref=254697>>.



Mermoud A. “*PVSYST Version 2.0 User's Manual*”. Group of Applied Physics and University Center for the Study of Energy Problems, University of Geneva, Switzerland, 1996.

Ministerio de Fomento. “*Anuario Estadístico*”. Madrid, 2008. <<http://www.fomento.es>>.

Ministerio de Fomento. “*Encuesta Permanente de Transportes de Mercancías por Carretera (EPTMC)*”. Madrid, 2008. <<http://www.fomento.es>>.

Ministerio de Fomento. “*Plan Estratégico de Infraestructuras y Transportes 2020*”. Documento propuesta. Madrid, Diciembre 2004. <<http://www.fomento.es>>.

Ministerio de Industria y Energía. “*Real Decreto 275/1995, de 24 de febrero, por el que se dicta las disposiciones de aplicación de la Directiva del Consejo de las Comunidades Europeas 92/42/CEE, relativa a los requisitos de rendimiento para las calderas nuevas de agua caliente alimentadas con combustibles líquidos o gaseosos, modificada por la directiva 93/68/CEE del consejo*”. BOE nº 73, de 27/03/1995. <<http://www.boe.es/boe/dias/1995/03/27/pdfs/A09414-09421.pdf>>.

Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. “*Programa CALENER*”. <<http://www.mityc.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/ProgramaCalener>>, 2009.

Ministerio de la Presidencia. “*Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios*”. BOE nº 207, de 29/08/2007. <<http://www.boe.es/boe/dias/2007/08/29/pdfs/A35931-35984.pdf>>.

Ministerio de la Presidencia. “*Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición*”. BOE nº 38, de 13/02/2008. <<http://www.boe.es/boe/dias/2008/02/13/pdfs/A07724-07730.pdf>>.

Ministerio de la Presidencia. “*Real Decreto 1328/1995, de 28 de julio, por el que se modifica, en aplicación de la Directiva 93/68/CEE, las disposiciones para la libre circulación de productos de construcción, aprobadas por el Real Decreto 1630/1992, de 29 de diciembre*”. BOE nº 198, de 19/08/1995. <<http://www.boe.es/boe/dias/1995/08/19/pdfs/A25860-25861.pdf>>.

Ministerio de la Presidencia. “*Real Decreto 1369/2007, de 19 de octubre, relativo al establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos que utilizan energía*”. BOE nº 254, de 23/10/2007. <<http://www.boe.es/boe/dias/2007/10/23/pdfs/A42974-42984.pdf>>.

Ministerio de la Presidencia. “*Real Decreto 1751/1998, de 31 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) y sus Instrucciones Técnicas Complementarias (ITE) y se crea la Comisión Asesora para las Instalaciones Térmicas de los Edificios*”. BOE nº 186, de 05/08/1998. <<http://www.boe.es/boe/dias/1998/08/05/pdfs/A26585-26634.pdf>>.

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 nº 27, de 31/01/2007. <<http://www.boe.es/boe/dias/2007/01/31/pdfs/A04499-04507.pdf>>.

Ministerio de la Vivienda. “*Real Decreto 1650/1977, de 10 de junio, sobre normativa de la edificación*”. BOE nº 163, de 09/07/1977.

Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. “*Resolución de 20 de enero de 2009, de la Secretaría de Estado de Cambio Climático, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015*”. BOE nº 49, de 26/02/2009.

Ministerio de Medio Ambiente. “*Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia. Horizonte 2007-2012-2020*”. Noviembre 2007. <<http://www.mma.es>>.

Ministerio de Medio Ambiente. “*Medidas Urgentes de la Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia. Horizonte 2007-2012-2020*”. Noviembre 2007. <<http://www.mma.es>>.

Ministerio de Medio Ambiente. “*Plan Nacional de Asignación de Derechos de Emisión 2008-2012*”. Madrid, Julio 2007. <<http://www.mma.es>>.

Ministerio de Medio Ambiente. “*Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de enero, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos*”. BOE nº 23, de 26/01/2008. <[http://www.cne.es/cne/doc/legislacion/RDL1\\_2008.pdf](http://www.cne.es/cne/doc/legislacion/RDL1_2008.pdf)>.

Ministerio de Relaciones con las Cortes y de la Secretaria del Gobierno. “*Real Decreto 1630/1992, de 29 de diciembre, por el que se dictan disposiciones para la libre circulación de productos de construcción, en aplicación de la Directiva 89/106/CEE*”. BOE nº 34, de 09/02/1993. <<http://www.boe.es/boe/dias/1993/02/09/pdfs/A03658-03664.pdf>>.

Ministerio de Vivienda. “*Real Decreto 2066/2008, de 12 de diciembre, por el que se regula el Plan Estatal de Vivienda y Rehabilitación 2009-2012*”. BOE nº 309, de 24/12/2008. <<http://www.boe.es/boe/dias/2008/12/24/pdfs/A51909-51937.pdf>>.

Ministerio de Vivienda. “*Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. Documentos Básicos de Ahorro de Energía y sobre Salubridad*”. BOE nº 74, de 28/03/2006. <<http://www.boe.es/boe/dias/2006/03/28/pdfs/A11816-11831.pdf>>.

Molina J.L. “*Simulación energética de edificios mediante un modelo de respuesta en frecuencia*”. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla, 1987. <<http://www.educacion.es/teseo/mostrarResult.do?ref=47937>>.

Mumford L. “*The Natural History of Urbanization*”. Man's Role in Changing the Face of the Earth. Edited by William L. Thomas. Symposium University of Chicago Press, 1956. pp. 382-98.

Naciones Unidas. “*Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*”. 1998. <<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>>.

Naredo J.M. “*La burbuja inmobiliario-financiera en la coyuntura económica reciente (1985-1995)*”. ISBN: 978-84-323-0913-7. Siglo XXI de España Editores, S.A. 1996.

Naredo J.M. “*Raíces económicas del deterioro ecológico y social. Más allá de los dogmas*”. ISBN: 978-84-323-1245-8. Siglo XXI de España Editores, S.A. 2006.

Naredo J.M., Frías J. “*Flujos de energía, agua, materiales e información en la Comunidad de Madrid*”. Consejería de Economía de la Comunidad de Madrid, Madrid, 1988.

Naredo J.M., Rueda S. “*La ciudad sostenible: resumen y conclusiones*”. Madrid: Biblioteca Ciudades para un futuro más sostenible. 1997. <<http://habitat.aq.upm.es/cs/p2/a010.html>>.

Naredo J.M., Valero A. “*Desarrollo económico y deterioro ecológico*”. Colección Economía y Naturaleza. Fundación Argentaria. ISBN: 84-7774-981-7. Madrid, 1998.

Nebel B., Cowell S. “*Global Warming Reduction Potential of biomass based products: an example of wood products*”. Society for Environmental Toxicology and Chemistry European Annual Meeting, 2003.

Nebel B., Zimmer B., Wegener G. “*Life Cycle Assessment of Wood Floor Coverings. A Representative Study for the German Flooring Industry*”. International Journal of Life Cycle Assessment 2006;11(3):172–182.

Nemry F., Uihlein A., Makishi C., Wittstock B., Braune A., Wetzel C., Hasan I., Niemeier S., Frech Y., Kreißig J., Gallon N. “*Environmental Improvement Potentials of Residential Buildings (IMPRO-Building)*”. JRC Scientific and Technical Reports. ISBN 978-92-79-09767-6. EUR 23493 EN – 2008. <<http://ftp.jrc.es/EURdoc/JRC46667.pdf>>.

Nemry F., Uihlein A., Makishi C., Wetzel C., Braune A., Wittstock B., Hasan I., Kreißig J., Gallon N., Niemeier S., Frech Y. “*Options to reduce the environmental impacts of residential buildings in the European Union—Potential and costs*”. Energy and Buildings 2010;42(7):976–984.

Niachou A., Papakonstantinou K., Santamouris M., Tsangrassoulis A., Mihalakakou G. “*Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance*”. Energy and Buildings 2001;33(7):719–729.

Nibel S., Luetzkendorf T., Knapen M., Boonstra C., Moffat S. “*Annex 31: Energy related environmental impact of buildings, technical synthesis report*”. International Energy Agency, 2005. <<http://www.iisbe.org/annex31/index.html>>.

Nicoletti G.M., Notarnicola B., Tassielli G. “*Comparative Life Cycle Assessment of flooring materials: ceramic versus marble tiles*”. Journal of Cleaner Production 2002;10(3):283–296.

NREL-National Renewable Energy Laboratory (2006) “U.S. Life-Cycle Inventory Database”. Extraído en 2006 de: <<http://hpb-1a.nrel.gov/lci>>.

Observatorio de la Sostenibilidad en España. “Estrategia Española de Sostenibilidad Urbana y Local (EESUL)”. Diciembre de 2009. <<http://www.sostenibilidad-es.org>>.

Ortiz O., Bonnet C., Bruno J.C., Castells F. “Sustainability based on LCM of residential dwellings: A case study in Catalonia, Spain”. Building and Environment 2009a;44:584–594.

Ortiz O., Castells F., Sonnemann G. “Operational energy in the life cycle of residential dwellings: The experience of Spain and Colombia”. Applied Energy 2010b;87(2):673–680.

Ortiz O., Castells F., Sonnemann G. “Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA”. Construction and Building Materials 2009b;23:28–39.

Ortiz O., Castells F., Sonnemann G. “Life cycle assessment of two dwellings: One in Spain, a developed country, and one in Colombia, a country under development”. Science of The Total Environment 2010a;408(12):2435–2443.

ÖSPAG (2002) “ÖSPAG Umwelterklärungen 2002 für die Standorte Gmunden und Wilhelmsburg”. (versión simplificada). ÖSPAG-Laufen, Gmunden.

Ozcáriz J., Prats F. “Cambio Global España 2020/50. Programa Ciudades. Hacia un pacto de las ciudades españolas ante el cambio global”. ISBN: 978-84-613-6581-4. Noviembre 2009. <<http://www.sostenibilidad-es.org>>.

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. “Directiva 2005/32/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 6 de julio de 2005 por la que se instaure un marco para el establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos que utilizan energía y por la que se modifica la Directiva 92/42/CEE del Consejo y las Directivas 96/57/CE y 2000/55/CE del Parlamento Europeo y del Consejo”. Diario Oficial de la Unión Europea, 22-07-2005.

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. “Directiva 2009/125/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de octubre de 2009 por la que se instaure un marco para el establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos relacionados con la energía”. Diario Oficial de la Unión Europea, 31-10-2009.

Parlamento Europeo. “Resolución legislativa del Parlamento Europeo, de 24 de abril de 2009, sobre la propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se establecen condiciones armonizadas para la comercialización de los productos de construcción”. (COM(2008)0311-C6-0203/2008-2008/0098(COD)). <<http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+TA+P6-TA-2009-0320+0+DOC+XML+V0//ES>>.

Pehnt M. “Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies”. Renewable Energy 2006;31(1):55-71.

- Pennington D.W., Margni M, Ammann C, Jolliet O. “*Multimedia fate and human intake modeling: spatial versus non-spatial insights for chemical emissions in Western Europe*”. Environmental Science Technology 2005;39:1119–1128.
- Pérez-Lombard L., Ortiz J., González R., Maestre I.R. “*A review of benchmarking, rating and labeling concepts within the framework of building energy certification schemes*”. Energy and Buildings 2009;41:272–278.
- Petersen A.K., Solberg B. “*Environmental and economic impacts of substitution between wood products and alternative materials: a review of micro-level analyses from Norway and Sweden*”. Forest Policy and Economics 2005;7:249–259.
- Peuportier B., Putzeys K. “*Inter-Comparison and Benchmarking of LCA-based environmental assessment and design tools*”. PRESCO Workpackage 2: Final report, 2005. <[http://www.etn-presco.net/generalinfo/PRESCO\\_WP2\\_Report.pdf](http://www.etn-presco.net/generalinfo/PRESCO_WP2_Report.pdf)>.
- Peuportier B., Scarpellini S., Glaumann M., Malmquist T., Krigsvol G., Wetzel C., Staller H., Szalay Z., Degiovanni V., Stoykova E. “*State of the art report*”. ENSLIC Workpackage 2: Final report, 2009. <[www.enslic.eu](http://www.enslic.eu)>.
- Peuportier B., Zabalza I., Glaumann M., Malmquist T., Krigsvol G., Wetzel C., Staller H., Tritthart W., Hajpál M., Stoykova E. “*Building LCA good practice report*”. LoRe LCA Workpackage 3: Draft report, 2010. Próximamente disponible en: <<http://www.sintef.no/Projectweb/LoRe-LCA>>.
- Peuportier B. “*Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the French context*”. Energy and Buildings 2001;33:443–450.
- Peuportier B., et al. “*Part 4 Application by target groups- Implementation of LCA by the main building actors*”. Final report REGENER project-European methodology for the evaluation of environmental impact of buildings. January 1997. <<http://www.cenerg.ensmp.fr/francais/themes/cycle/pdf/regener4.pdf>>.
- Pimentel D., Hurd L.E., Bellotti A.C., Forster M.J., Oka N., Sholes O.D., et al. “*Food Production and the Energy Crisis*”. Science 1973;182(4111):443–449.
- Podolinsky S. “*Socialism and the unity of physical forces*”. Organization & Environment 2004;17(1):61–75.
- Polster B., Peuportier B., Blanc Sommereux I., Diaz Pedregal P., Gobin C., Durand E. “*Evaluation of the environmental quality of buildings - a step towards a more environmentally conscious design*”. Solar Energy 1996;57(3):219–230.
- Prats F. (2001). “*Sostenibilidad y políticas urbanas y locales: el caso de las ciudades españolas*”. Biblioteca Ciudades para un futuro más sostenible. <<http://habitat.aq.upm.es/cs/p3/a011.html>>.
- Prek M. “*Environmental impact and life cycle assessment of heating and air conditioning systems, a simplified case study*”. Energy and Buildings 2004;36:1021–1027.

- Presidencia del Gobierno. “*Real Decreto 2429/79 de 6 de Julio, por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación NBE-CT79, sobre Condiciones Térmicas en los Edificios*”. BOE nº 253, de 22/10/1979. <[http://www.uclm.es/area/ing\\_rural/Normativa/NBE-CT79.pdf](http://www.uclm.es/area/ing_rural/Normativa/NBE-CT79.pdf)>.
- Pulselli R.M., Simoncini E., Marchettini N. “*Energy and emergy based cost-benefit evaluation of building envelopes relative to geographical location and climate*”. *Building and Environment* 2009;44(5):920–928.
- Pulselli R.M., Simoncini E., Pulselli F.M., Bastianoni S. “*Emergy analysis of building manufacturing, maintenance and use: em-building indices to evaluate housing sustainability*”. *Energy and Buildings* 2007;39(5):620–628.
- REE-Red Eléctrica de España, 2008. “*El sistema eléctrico español. Informe 2008*”. <<http://www.ree.es>>.
- Rees W., Wackernagel M. “*Urban ecological footprints: Why cities cannot be sustainable-And why they are a key to sustainability*”. *Environmental Impact Assessment Review* 1996;16(4–6):223–248.
- Richter K., Fischer M., Gahlmann H., Menard M. (1995) “*Energie- und Stoffbilanzen bei der Herstellung von Wärmedämmstoffen*”. Eidg. Materialprüfungs und Forschungsanstalt (EMPA), Dübendorf.
- Rieradevall J., Vinyets J. (2003) “*Ecodiseño y Ecoproductos*”. Ed. Rubes, Barcelona.
- Riga P., Alava S., Uson A., Blanco F., Garbisu C., Aizpurua A., Tejero T., Larrea A. “*Evaluation of recycled rockwool as a component of peat-based mixtures for geranium (*Pelargonium peltatum* L.) production*”. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, ISSN 1462-0316. 2003;78,2:213–218.
- Rivela B., Moreira M.T., Muñoz I., Rieradevall J., Feijoo G. “*Life cycle assessment of wood wastes: A case study of ephemeral architecture*”. *Science of The Total Environment* 2006;357(1–3):1–11.
- Romay M. “*La valorización energética de residuos en la industria española del cemento*”. *Revista Técnica Cemento Hormigón* (ISSN 0008-8919) 31-Especial sobre la industria cementera y el medio ambiente 2004;869:0–21.
- Rønning A., Nereng G., Vold M., Bjørberg S., Lassen N. “*JOMAR-A Model for Accounting the Environmental Loads from Building Constructions*”. 2007. Stiftelsen Østfoldforskning. Final Report OR.07.07. ISBN 978-82-7520-572-6/7 <<http://ostfoldforskning.no/uploads/dokumenter/publikasjoner/44.pdf>>.
- Rosselló-Batle B., Moià A., Cladera A., Martínez V. “*Energy use, CO<sub>2</sub> emissions and waste throughout the life cycle of a sample of hotels in the Balearic Islands*”. *Energy and Buildings* 2010;42(4):547–558.
- Rueda S. “*Barcelona, ciudad mediterránea, compacta y compleja: una visión de futuro más sostenible*”. Ayuntamiento de Barcelona - Agencia de Ecología Urbana. 2002.

- Rueda S. “*Ciudades más sostenibles: la ecología y las estrategias empleadas por la naturaleza*”. Ayuntamiento de Barcelona - Agencia de Ecología Urbana. 2000.
- Rueda S. “*Los costes ambientales de los modelos urbanos dispersos*”. Ayuntamiento de Barcelona - Agencia de Ecología Urbana. 2001.
- Saiz S., Kennedy C., Bass B., Pressnail K. “*Comparative Life Cycle Assessment of Standard and Green Roofs*”. *Environmental Science & Technology* 2006;40(13):4312–4316.
- Sandén B.A., Karlström M. “*Positive and negative feedback in consequential life-cycle assessment*”. *Journal of Cleaner Production* 2007;15(15):1469–1481.
- Sanjuán M.A. “*Los cementos de adición en España del año 2000 al 2005*”. *Revista Técnica Cemento Hormigón* (ISSN: 0008-8919) 2007;909:4–55.
- Sartori I., Hestnes A.G. “*Energy use in the life cycle of conventional and low energy buildings: A review article*”. *Energy and Buildings* 2007;39:249–257.
- Scarpellini S., Zabalza I., Aranda A., Llera E., Díaz S., Glaumann M., Malmqvist T. “*Life cycle assessment in buildings: the ENSLIC simplified method and guidelines*”. 5th Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 29 September – 3 October 2009, Dubrovnik, Croatia.
- Scheuer C., Keoleian G.A., Reppe P. “*Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications*”. *Energy and Buildings* 2003;35:1049–1064.
- Schmidheiny S. (1992) “*Changing Course: A Global Business Perspective on Development and the Environment*”. ISBN 0-262-69153-1. Massachusetts Institute of Technology, USA.
- SEMC. “*MSR 1999:2-Requirements for environmental product declarations*”. Swedish Environmental Management Council, 2000. <<http://www.environdec.com>>.
- Shukla A., Tiwari G.N., Sodha M.S. “*Embodied energy analysis of adobe house*”. *Renewable Energy* 2009;34(3):755–761.
- Sleeswijk A.W., Van Oers L.F.C.M., Guinée J.B., Struijs J., Huijbregts M.A.J. “*Normalisation in product life cycle assessment: An LCA of the global and European economic systems in the year 2000*”. *Science of the Total Environment* 2008;390 (1):227–240.
- Sociedad de Tasación S.A. “*Precios de la vivienda. Mercado inmobiliario*”. Diciembre 2009. <<http://web.st-tasacion.es>>.
- Society for the Promotion of LCA Development (SPOLD). “*The LCA Sourcebook*”. 1993.
- Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC). “*Guidelines for Life Cycle Assessment: A “Code of Practice”*”. 1993.

Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC). *“Towards a Methodology for Life Cycle Impact Assessment”*. 1996.

Starzner S., Wurmer-Weiss P. (2000) *“ECOBIS 2000, ökologisches Baustoffinformationssystem”*.

Steen B. *“A systematic Approach to Environmental Priority Strategies in Product Development (EPS). Version 2000 - General system characteristics”*. CPM Report 1999a. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, <<http://eps.esa.chalmers.se/EPS%20System%20Characteristics.pdf>>.

Steen B. *“A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Version 2000 - Models and data of the default method”*. CPM Report 1999b. Technical Environmental Planning, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden. <<http://eps.esa.chalmers.se/download.htm#item2>>.

Task Group 4. *“Life Cycle Costs in Construction”*. Final report 2003. <<http://www.ceetb.eu/docs/Reports/LCC%20FINAL%20REPORT-2.pdf>>.

Teal R.F. *“Carpooling: Who, how and why”*. Transportation Research Part A: General 1987;21(3):203–214.

Thormark C. *“A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation and recycling potential”*. Building and Environment 2002;37:429–435.

Thormark C. *“The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building”*. Building and Environment 2006;41:1019–1026.

Todd J.A., et al. *“Comparative assessment of environmental performance tools and the role of the Green Building Challenge”*. Building Research & Information 2001;29:324-335.

Toffoletto C., Bulle J., Godin C., Reid C., Deschênes L. *“LUCAS – A New LCIA Method Used for a Canadian-Specific Context”*. International Journal of Life Cycle Assessment 2007;12(2):93–102.

Tremeac B., Meunier F. *“Life cycle analysis of 4.5 MW and 250 W wind turbines”*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009;13(8):2104–2110.

Tritthart W., Staller H., Zabalza I., Malmquist T., Peuportier B., Wetzel C., Hajpál M., Stoykova E., Krigsvol G. *“State of the art report – Use of life cycle assessment. Methods and tools”*. LoRe LCA Workpackage 2: Draft report, 2010. Próximamente disponible en: <<http://www.sintef.no/Projectweb/LoRe-LCA>>.

Turégano J.A., Hernández M.A. (2001). *“Meteo, aplicación informática para el análisis termoambiental de edificios”*. Grupo de Energía y Edificación de la Universidad de Zaragoza, registro provincial de la propiedad intelectual de Zaragoza nº 4251.

Turégano J.A., Hernández M.A., García F. (2001) *“El urbanismo bioclimático en Residencial Parque Goya”*. Diputación General de Aragón – Departamento de Industria, Comercio y Desarrollo.



Turégano J.A., Hernández M.A., García F. (2002a). “*Análisis de la urbanización de Valdespartera*”. Grupo de Energía y Edificación de la Universidad de Zaragoza.

Turégano J.A., Hernández M.A., García F. (2002b). “*URSOS. Diseño bioclimático y optimización energética de urbanizaciones*”. Programa de simulación cofinanciado por el IDAE, desarrollado por el Grupo de Energía y Edificación de la Universidad de Zaragoza.

Turégano J.A., Velasco M.C., Martínez A. “*Arquitectura bioclimática y urbanismo sostenible*”. Volumen I. Colección de Textos docentes nº 159. Serie Energías Renovables. ISBN: 978-84-92774-23-4. Prensas Universitarias de Zaragoza. Universidad de Zaragoza. 2009.

U.S. Geological Survey (2009) “*Mineral commodity summaries 2009*”. United States Government Printing Office, Washington.

Udo de Haes H., Van Rooijen M. “*Life cycle approaches. The road from analysis to practice*”. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative. 2005.

Uihlein A., Eder P. “*Policy options towards an energy efficient residential building stock in the EU-27*”. Energy and Buildings 2010;42(6):791–798.

UNE-EN 300:1997. “*Tableros de virutas orientadas (OSB). Definiciones, clasificación y especificaciones*”. 1997.

UNE-EN ISO 14040:2006 “*Gestión Ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia*”. 2006.

UNE-EN ISO 14044:2006 “*Gestión Ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices*”. 2006.

UNE-ISO 14025:2007 “*Etiquetas y declaraciones ambientales. Declaraciones ambientales tipo III. Principios y procedimientos*”. ISO, Ginebra, 2006.

USDA - United States Department of Agriculture, National Agricultural Statistics Service (2006). “*Commercial Livestock Slaughter by Months, IOWA and U.S - Average Live Weight (Pounds)*”, Iowa Agricultural Statistics Bulletin, p 101.

Valero A. “*Bases Termoeconómicas del Ahorro de Energía*”. Comunicación 2ª Conferencia Nacional sobre Ahorro Energético y Alternativas Energéticas. Zaragoza, 1982:199-221.

Valero A. “*On the energy costs of present day society*”. ASME. AES, Vol. 35. Keynote presentation. Thermodynamics and the design, analysis and improvement of energy systems. Ed. R.J. Krane, ASME Book nº H01045, pp. 1-15. San Francisco, California, 1995.

Valero A. “*Reflexiones sobre los costes energéticos de la sociedad actual*”. Economía Industrial 1994;297:117–123.

Valero A., Lozano M.A., Muñoz M. (1986). “*A General Theory of Exergy Saving*”. Ed. R.A. Gaggioli. Computer–Aided Engineering and Energy Systems. ASME–AES vol. 2–3, pp. 1–21. ASME Book nº H0341C. New York.

- Valero Delgado A. “*Exergy Evolution of the Mineral Capital on Earth / Estudio de la Evolución Exergética del Capital Mineral de la Tierra*”. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza-Departamento de Ingeniería Mecánica, 2008. <<https://www.educacion.es/teseo/mostrarRef.do?ref=730386>>.
- Valero Delgado A., Valero Capilla A. “*El agotamiento de la gran mina Tierra*”. El Ecologista 2009;63:18–21.
- Valero Delgado A., Valero Capilla A., Mudd G. “*Exergy - A Useful Indicator for the Sustainability of Mineral Resources and Mining*”. SDIMI Conference. Gold Coast, QLD, (Australia), 6-8 July 2009.
- Van der Lugt P., Van den Dobbelsteen A.A.J.F., Janssen J.J.A. “*An environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures*”. Construction and Building Materials 2006;20:648–656.
- Van Halen C., Vissers P., Copius E., Osset P., Gaymard S., Schuurmans A. “*Comparative study of national schemes aiming to analyse the problems of LCA tools and the environmental aspects in the harmonised standards*”. PriceWaterhouseCoopers, 2002.
- Varun, Bhat I.K., Prakash R. “*LCA of renewable energy for electricity generation systems—A review*”. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009;13(5):1067–1073.
- Vázquez M. “*Construcción e impacto sobre el ambiente: el caso de la tierra y otros materiales*”. Informes de la Construcción 2001;52(471).
- Vázquez M. “*Arquitectura, economía y ecología*”. Boletín CF+S, 14- Hacia una arquitectura y un urbanismo basados en criterios bioclimáticos. 2000a. <<http://habitat.aq.upm.es/boletin/n8/amvaz.html>>.
- Vázquez M. “*Ciudades sostenibles*”. Boletín CF+S, 8-Ciudad, economía, ecología y salud. 1999. <<http://habitat.aq.upm.es/boletin/n8/amvaz.html>>.
- Vázquez M. “*Una brevisima historia de la arquitectura solar*”. Boletín CF+S, 9- Por una arquitectura y un urbanismo contemporáneos. 2000b. <<http://habitat.aq.upm.es/boletin/n8/amvaz.html>>.
- Verbeeck G., Hens H. “*Life cycle inventory of buildings: A calculation method*”. Building and Environment 2010b;45(4):1037–1041.
- Verbeeck G., Hens H. “*Life cycle inventory of buildings: A contribution analysis*”. Building and Environment 2010a;45(4):964–967.
- Verein Deutscher Ingenieure-VDI (1997) “*Cumulative Energy Demand - Terms, Definitions, Methods of Calculation*”. VDI-Richtlinien 4600, Düsseldorf.
- Vinuesa J. “*La vivienda vacía en España: un despilfarro social y territorial insostenible*”. Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales. vol. XII, nº 270 (39). ISSN: 1138-9788. Universidad de Barcelona, 2008. <<http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-270/sn-270-39.htm>>.

Vogel M., Pestalozzi C., et al. (2003). EcoDevis – “*Ökologische Leistungsbeschreibungen von Bauprodukten*”. Trägerverband eco-devis c/o Hochbauamt des Kantons Bern.

Voss K., Riley M. “*Towards Net Zero Energy Solar Buildings*”. Annex Final Revised. IEA SHC Task 40 – IEA ECBCS Annex 52. Febrero 2009. <[http://www.iea-shc.org/publications/downloads/task40-Net\\_Zero\\_Energy\\_Solar\\_Buildings.pdf](http://www.iea-shc.org/publications/downloads/task40-Net_Zero_Energy_Solar_Buildings.pdf)>.

Wadel G. “*La sostenibilidad en la construcción industrializada. La construcción modular ligera aplicada a la vivienda*”. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya- Departament de Construccions Arquitectòniques, 2009. <<http://www.tdx.cat/TDX-0122110-180946>>.

WCED - World Commission on Environment and Development. “*Our Common Future*”. Oxford University Press. ISBN: 019282080X. 1987.

Weibel T., Stritz A. (1995) “*Ökoinventare und Wirkungsbilanzen von Baumaterialien; Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Hochbaukonstruktionen*”. ESU-Reihe Nr. 1/95. Laboratorium für Energiesysteme, Eid. Techni-sche Hochschule (ETH), Zürich.

Weidema B.P. “*The Integration of Economic and Social Aspects in Life Cycle Impact Assessment*”. International Journal of Life Cycle Assessment 2006;11 (Special 1):89–96.

Weidema B.P., et al. (2005). “*Prioritisation within the integrated product policy*”. Environmental Project n° 980. Danish Ministry of the Environment, Copenhagen.

Wells A., Gegner L.E., Earles R. (2000). “*Sustainable Sheep Production - Livestock Production Guide, Appropriate Technology Transfer for Rural Areas (ATTRA)*”. Extraído en 2007 de: <<http://www.attra.ncat.org/attrapub/PDF/sheep.pdf>>.

Wendehorst R., Vollenschaar D. (1998) “*Baustoffkunde*”. 25. überarbeitete Aufl. Edition. Vincentz, Hannover.

Wenzel H., Hauschild M., Alting L. (1997) “*Environmental Assessment of Products. Volume I - Methodology, tools and case studies in product development*”. 1st Edition. Champan & Hall, London (UK), Weinheim (Germany), New York (USA), Tokyo (Japan), Melbourne (Australia), Madras (India).

Werner F., Althaus H.J., Künniger T., Richter K., Jungbluth N. (2007) “*Life Cycle Inventories of Wood as Fuel and Construction Material*”. Final report ecoinvent 2000 n° 9. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Suiza.

World Business Council for Sustainable Development and World Resources Institute. “*Greenhouse Gas Protocol*”. <<http://www.ghgprotocol.org>>.

Xing S., Xu Z., Jun G. “*Inventory analysis of LCA on steel- and concrete-construction office buildings*”. Energy and Buildings 2008;40:1188–1193.

Yohanis Y.G., Norton B. “*Life-cycle operational and embodied energy for a generic single-storey office building in the UK*”. Energy 2002;27:77–92.

Zabalza I., Aranda A., Scarpellini S., Díaz S. “*Life cycle assessment in building sector: State of the art and assessment of the environmental impact of the building materials*”. 1st International Exergy, Life Cycle Assessment, and Sustainability Workshop & Symposium ELCAS, 4–6 June, 2009b, Nisyros, Greece.

Zabalza I., Aranda A. “*Energía solar térmica*”. Colección de Textos Docentes nº 141. Serie Energías renovables. ISBN: 978-84-92521-72-2. Prensas Universitarias de Zaragoza, 2009.

Zabalza I., Aranda A., Scarpellini S. “*Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification*”. Building and Environment 2009a;44:2510–20.

Zabalza I., Scarpellini S., Aranda A. “*Life Cycle Assessment in Buildings*”. Vector1 Media, 2008a. <<http://www.vector1media.com/articles/features/5202-life-cycle-assessment-in-buildings>>.

Zabalza I., Aranda A., Díaz S. “*Manual práctico de certificación energética de edificios*”. Universidad de Zaragoza. Colección de Textos Docentes nº 148. ISBN: 978-84-92521-61-6. Prensas Universitarias de Zaragoza, 2008b.

Zabalza I., Aranda A., Scarpellini S., Llera E., Martínez A. “*Energías renovables en Aragón*”. Editado por Cámara de Comercio e Industria de Zaragoza, Confederación de Empresarios de Aragón y Caja de Ahorros de la Inmaculada. ISBN 978-84-87807-37-4. Zaragoza, 2009. <[http://www.camarazaragoza.com/docs/Energias\\_renovables\\_Aragon\\_12272.pdf](http://www.camarazaragoza.com/docs/Energias_renovables_Aragon_12272.pdf)>.

Zabalza I., Llera E., Aranda A., Martínez A., Scarpellini S., Barrio F. “*El ahorro energético en el nuevo código técnico de la edificación*”. ISBN: 10: 84-96743-30-6. Fundación Confemetal. Madrid, 2007.

Zabalza I., Valero A. “*Modelización de los costes energéticos y medioambientales y análisis de sostenibilidad en núcleos urbanos*”. ISBN 0422-2784. Economía Industrial 2003;351:129–142.

Zhang Z., Wu X., Yang X., Zhu Y. “*BEPAS—a life cycle building environmental performance assessment model*”. Building and Environment 2006;41:669–675.

Ziegler M., Bättig R. “*Swiss greenhouse gas abatement cost curve*”. McKinsey&Company. 2009. <<http://www.mckinsey.com>>.

Zold A., Szalay Z. “*What is missing from the concept of the new European Building Directive?*”. Building and Environment 2007;42(4):1761–1769.

# INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1. PROCESOS LINEALES ABIERTOS VERSUS PROCESOS CÍCLICOS CERRADOS .....	2
FIGURA 1.2. EVOLUCIÓN DEL PIB A PRECIOS DE MERCADO Y DEL VALOR AÑADIDO BRUTO A PRECIOS BÁSICOS DEL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN EN ESPAÑA EN EL PERIODO 2000-2009.....	6
FIGURA 1.3. VAB DE LA CONSTRUCCIÓN COMO PORCENTAJE DEL PIB EN DISTINTOS PAÍSES EUROPEOS DURANTE EL PRIMER TRIMESTRE DE 2009.....	6
FIGURA 1.4. VOLUMEN DE NEGOCIO EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN SEGÚN EL TIPO DE OBRA EN 2007.....	7
FIGURA 1.5. EVOLUCIÓN DE LAS LICENCIAS DE OBRA PARA EDIFICIOS SEGÚN TIPO DE OBRA EN EL PERIODO 1999-2008.....	7
FIGURA 1.6. EVOLUCIÓN DEL NÚMERO DE PUESTOS DE TRABAJO TOTALES Y EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN EN ESPAÑA EN EL PERIODO 2000-2009.....	8
FIGURA 1.7. EVOLUCIÓN DEL NÚMERO DE VIVIENDAS Y DE LA POBLACIÓN EN ESPAÑA EN EL PERIODO 1950-2009.....	8
FIGURA 1.8. DISTRIBUCIÓN DE VIVIENDAS UNIFAMILIARES DE NUEVA PLANTA EN FUNCIÓN DE LA SUPERFICIE ÚTIL.....	9
FIGURA 1.9. DISTRIBUCIÓN DE BLOQUES DE VIVIENDAS DE NUEVA PLANTA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE PLANTAS DEL EDIFICIO.....	9
FIGURA 1.10. EVOLUCIÓN DE LA SUPERFICIE ÚTIL DE LAS VIVIENDAS PRINCIPALES EN EL PERIODO 1991-2001.....	10
FIGURA 1.11. DISTRIBUCIÓN DE VIVIENDAS POR AÑO DE CONSTRUCCIÓN.....	10
FIGURA 1.12. PORCENTAJE DE VIVIENDAS FAMILIARES PRINCIPALES Y NO PRINCIPALES.....	12
FIGURA 1.13. TIPOS DE INTERÉS Y NÚMERO DE VIVIENDAS INICIADAS.....	13
FIGURA 1.14. EVOLUCIÓN DEL PRECIO MEDIO DE LA VIVIENDA EN ESPAÑA EN EL PERIODO 1985-2009.....	13
FIGURA 1.15. REDUCCIÓN PER CÁPITA DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN FUNCIÓN DEL INCREMENTO DE LA DENSIDAD URBANA EN DIVERSAS CIUDADES DEL MUNDO.....	14
FIGURA 1.16. EVOLUCIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA FINAL (KTEP/AÑO) EN ESPAÑA DURANTE EL PERIODO 1996-2007 EN LOS DISTINTOS SECTORES DE ACTIVIDAD.....	16
FIGURA 1.17. EVOLUCIÓN DE LA INTENSIDAD ENERGÉTICA DE LOS HOGARES EN ESPAÑA DURANTE EL PERIODO 1990-2007.....	16
FIGURA 1.18. PRIMERA CASA SOLAR MIT I EN 1939.....	18
FIGURA 1.19. PORCENTAJE DE CONSUMO ENERGÉTICO DEL SECTOR DE LA EDIFICACIÓN RESPECTO AL CONSUMO ENERGÉTICO TOTAL EN DISTINTAS ZONAS DEL MUNDO.....	19

FIGURA 1.20.	EVOLUCIÓN HACIA EL OBJETIVO DE EDIFICIOS DE ENERGÍA CERO. .	20
FIGURA 1.21.	DISTANCIA DE DISTINTOS TIPOS DE ESTÁNDARES DE EDIFICACIÓN AL ESTÁNDAR LC-ZEB .....	26
FIGURA 2.1.	POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL DE LAS DISTINTAS TIPOLOGÍAS DE EDIFICIOS DE LA UE-25 ANALIZADOS .....	51
FIGURA 2.2.	METODOLOGÍA GENERAL DEL ACV .....	62
FIGURA 2.3.	OPCIONES DE DISEÑO DE UN EDIFICIO FRENTE A DISPONIBILIDAD DE DATOS. ....	63
FIGURA 2.4.	INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA APLICADO A UN PROCESO UNITARIO DEL SISTEMA.....	66
FIGURA 2.5.	EFICIENCIA DE UNA CALDERA A LO LARGO DE UNA VIDA ÚTIL DEL EDIFICIO DE 80 AÑOS SEGÚN LOS ENFOQUES ESTÁTICO Y DINÁMICO. ....	70
FIGURA 2.6.	RESULTADOS DEL ACV DE UN EDIFICIO CONSIDERANDO LA EFICIENCIA DE LA CALDERA CONSTANTE (ACV ESTÁTICO) O VARIABLE (ACV DINÁMICO) .....	70
FIGURA 2.7.	ACV DE UN EDIFICIO EN SIMAPRO 7: ÁRBOL DE PROCESOS PRINCIPALES DEL EDIFICIO.....	97
FIGURA 2.8.	ACV DE UN EDIFICIO EN GABI 4.....	98
FIGURA 2.9.	ENTRADA DE DATOS EN EQUER.....	102
FIGURA 2.10.	RESULTADOS EN EQUER.....	103
FIGURA 3.1.	CONTRIBUCIÓN DE LOS MATERIALES NECESARIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE 1 M2 SOBRE LA ENERGÍA INCORPORADA PARA SU FABRICACIÓN. ....	117
FIGURA 3.2.	CONTRIBUCIÓN DE LOS MATERIALES NECESARIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE 1 M2 SOBRE LAS EMISIONES DE CO2 ASOCIADAS A SU FABRICACIÓN. ....	117
FIGURA 3.3.	MODELIZACIÓN DE LA CURVA AHORRO-INVERSIÓN.....	122
FIGURA 3.4.	SECADERO (IZQDA.) Y LÍNEAS DE DECORACIÓN-ESMALTACIÓN (DCHA.) .....	129
FIGURA 3.5.	HORNO DE COCCIÓN (IZQDA.) Y SECCIÓN DE PULIDO-RECTIFICADO (DCHA.) .....	130
FIGURA 3.6.	CURVA AHORRO-INVERSIÓN DEL SECTOR CERÁMICO EN ESPAÑA ..	140
FIGURA 3.7.	CURVA AHORRO-INVERSIÓN DEL SECTOR DE LOS AISLAMIENTOS TÉRMICOS EN ESPAÑA.....	154
FIGURA 3.8.	CURVA AHORRO-INVERSIÓN DEL SECTOR DEL CEMENTO EN ESPAÑA .....	167
FIGURA 3.9.	CURVA AHORRO-INVERSIÓN DEL SECTOR MADERERO EN ESPAÑA ..	176
FIGURA 3.10.	EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL EN EMISIONES DE CO2 EQUIVALENTES DE 1T*KM EN DISTINTOS MEDIOS DE TRANSPORTE (TERRESTRE – ARRIBA, FERROVIARIO – ABAJO IZQDA., Y MARÍTIMO – ABAJO DCHA.) .....	193

FIGURA 3.11. DISTRIBUCIÓN DEL IMPACTO EN ENERGÍA INCORPORADA (IZQDA.) Y POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (DCHA.) DE 1 T*KM EN DISTINTOS MEDIOS DE TRANSPORTE.....	193
FIGURA 3.12. TRANSPORTE DE LAS MATERIAS PRIMAS EN LA ETAPA DE FABRICACIÓN DE LADRILLOS, BALDOSAS Y TEJAS (ARRIBA) Y AISLAMIENTOS TÉRMICOS (ABAJO).....	194
FIGURA 3.13. TRANSPORTE DE LAS MATERIAS PRIMAS EN LA ETAPA DE FABRICACIÓN DE CEMENTO Y HORMIGÓN(ARRIBA) Y MATERIALES COMUNES (ABAJO) .....	195
FIGURA 3.14. TRANSPORTE DE LAS MATERIAS PRIMAS EN LA ETAPA DE FABRICACIÓN DE MADERAS .....	195
FIGURA 3.15. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL NÚMERO DE TONELADAS-KILÓMETRO POR TIPO DE DESPLAZAMIENTO EN CARRETERA EN ESPAÑA EN 2008. .	196
FIGURA 3.16. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE TONELADAS TRANSPORTADAS (IZQDA.) Y DE TONELADAS-KILÓMETRO (DCHA.) POR CARRETERA SEGÚN TIPO DE MERCANCÍA EN ESPAÑA EN 2008,.....	197
FIGURA 3.17. EVOLUCIÓN DE LA DEMANDA DE TRANSPORTE EN MILLONES DE T*KM EN ESPAÑA .....	198
FIGURA 3.18. PRINCIPALES CORREDORES Y RED DE TERMINALES DE TRÁFICO FERROVIARIO DE MERCANCÍAS EN ESPAÑA (ARRIBA) Y SISTEMA PORTUARIO (ABAJO) .....	199
FIGURA 3.19. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA EN ENERGÍA INCORPORADA DE LADRILLOS, BALDOSAS Y TEJAS.....	202
FIGURA 3.20. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA EN POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (ARRIBA ) Y HUELLA HÍDRICA (ABAJO) DE LADRILLOS, BALDOSAS Y TEJAS .....	202
FIGURA 3.21. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA EN PUNTUACIÓN ÚNICA DE LADRILLOS, BALDOSAS Y TEJAS.....	203
FIGURA 3.22. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA EN ENERGÍA INCORPORADA DE AISLAMIENTOS TÉRMICOS.....	204
FIGURA 3.23. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA EN POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (ARRIBA) Y HUELLA HÍDRICA (ABAJO) DE AISLAMIENTOS TÉRMICOS .....	205
FIGURA 3.24. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA EN PUNTUACIÓN ÚNICA DE AISLAMIENTOS TÉRMICOS.....	205
FIGURA 3.25. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA EN ENERGÍA INCORPORADA DE CEMENTO Y HORMIGÓN .....	206
FIGURA 3.26. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA EN POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (ARRIBA) Y HUELLA HÍDRICA (ABAJO) DE CEMENTO Y HORMIGÓN .....	207
FIGURA 3.27. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA EN PUNTUACIÓN ÚNICA DE CEMENTO Y HORMIGÓN .....	207
FIGURA 3.28. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA EN ENERGÍA INCORPORADA DE MADERAS .....	209

FIGURA 3.29. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA EN POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (ARRIBA) Y HUELLA HÍDRICA (ABAJO) DE MADERAS .....	210
FIGURA 3.30. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA EN PUNTUACIÓN ÚNICA DE MADERAS .....	210
FIGURA 3.31. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA EN ENERGÍA INCORPORADA DE DIVERSOS MATERIALES COMUNES .....	211
FIGURA 3.32. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA EN POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (ARRIBA) Y HUELLA HÍDRICA (ABAJO) DE DIVERSOS MATERIALES COMUNES .....	212
FIGURA 3.33. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA EN PUNTUACIÓN ÚNICA DE DIVERSOS MATERIALES COMUNES .....	212
FIGURA 3.34. SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS ECOEFICIENTES PARA MUROS EXTERIORES DE VIVIENDAS.....	214
FIGURA 4.1. ETAPAS DEL CICLO DE VIDA DE UN EDIFICIO SEGÚN CEN/TC 350 .....	219
FIGURA 4.2. EVOLUCIÓN DEL CONSUMO DOMÉSTICO (EN M3/AÑO) EN ZARAGOZA EN EL PERIODO 2000-2008 .....	229
FIGURA 4.3. RATIO DE CONSUMO DE AGUA (EN M3/DÍA) SEGÚN EL Nº DE PERSONAS DE LA VIVIENDA .....	230
FIGURA 4.4. PROYECTO DE URBANIZACIÓN DE LA ECOCIUDAD VALDESPARTERA.....	234
FIGURA 4.5. IMÁGENES DEL EDIFICIO Nº 1 OBJETO DEL ESTUDIO: FACHADAS NORTE Y SUR (ARRIBA) Y DETALLE DE LOS INVERNADEROS Y CAPTADORES SOLARES TÉRMICOS DEL EDIFICIO (ABAJO).....	235
FIGURA 4.6. VISTA GENERAL DE LA PLANTA BAJA DE LA PARCELA 12 (IZQDA.) Y DE LOS APARCAMIENTOS DE LA PARCELA 12 (DCHA.).....	237
FIGURA 4.7. MUROS DE CONTENCIÓN DE LOS EDIFICIOS DE LA PARCELA 12 (RESALTADOS EN COLOR ROJO).....	238
FIGURA 4.8. DIMENSIONES DE LOS MUROS DE CONTENCIÓN DEL EDIFICIO Nº 1..	238
FIGURA 4.9. IMAGEN DEL EDIFICIO Nº 2 OBJETO DEL ESTUDIO .....	244
FIGURA 4.10. VISTA GENERAL DEL SÓTANO 1 (IZQDA.), SÓTANO 2 (CENTRO) Y BLOQUE SUR DE LA PARCELA 24 (DCHA.).....	246
FIGURA 4.11. MUROS DE CONTENCIÓN DE LOS EDIFICIOS DE LA PARCELA 24 .....	247
FIGURA 4.12. DIMENSIONES DE LOS MUROS DE CONTENCIÓN DEL EDIFICIO Nº 2..	247
FIGURA 4.13. VISTA GENERAL DEL EDIFICIO CIRCE .....	254
FIGURA 4.14. SECCIÓN DEL EDIFICIO CIRCE.....	254
FIGURA 4.15. DETALLE DE LAS CUBIERTAS VEGETALES E INVERNADERO.....	255
FIGURA 4.16. ENTORNO DEL EDIFICIO CIRCE.....	256
FIGURA 4.17. DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LOS CONSUMOS DE ENERGÍA FINAL PARA CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN (INCLUYENDO LOS CONSUMOS DE BOMBAS, VENTILADORES Y AUXILIARES).....	262



FIGURA 4.18. PRODUCCIÓN ESPECÍFICA DE LOS DISTINTOS MÓDULOS FOTVOLTAICOS PARA UNA INCLINACIÓN DE 0° Y 30° .....	263
FIGURA 4.19. APORTE SOLAR TÉRMICO MENSUAL PARA CALEFACCIÓN DEL EDIFICIO .....	264
FIGURA 4.20. CURVA DE POTENCIA DEL AEROGENERADOR INCLIN 6.000 .....	265
FIGURA 4.21. ENERGÍA INCORPORADA (EN TJ-EQ) DESAGREGADA POR CATEGORÍAS DE IMPACTO EN LAS DISTINTAS ETAPAS DE LA VIDA ÚTIL DEL EDIFICIO RESIDENCIAL N° 1.....	268
FIGURA 4.22. ENERGÍA INCORPORADA (EN TJ-EQ) DESAGREGADA POR CATEGORÍAS DE IMPACTO EN LAS DISTINTAS ETAPAS DE LA VIDA ÚTIL DEL EDIFICIO RESIDENCIAL N° 2.....	268
FIGURA 4.23. ENERGÍA INCORPORADA (EN TJ-EQ) DESAGREGADA POR CATEGORÍAS DE IMPACTO EN LAS DISTINTAS ETAPAS DE LA VIDA ÚTIL DEL EDIFICIO DE OFICINAS/I+D.....	269
FIGURA 4.24. ENERGÍA INCORPORADA DESAGREGADA EN LOS DISTINTOS ASPECTOS DEL CICLO DE VIDA DE LOS EDIFICIOS ANALIZADOS: RESIDENCIAL N° 1 (ARRIBA), RESIDENCIAL N° 2 (CENTRO), OFICINAS/I+D (ABAJO).....	270
FIGURA 4.25. ENERGÍA INCORPORADA (EN GJ-EQ) EN LA FABRICACIÓN DE LOS DISTINTOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DEL EDIFICIO RESIDENCIAL N° 1 (ARRIBA IZQDA.), N° 2 (ARRIBA DCHA.), Y OFICINAS/I+D /ABAJO) .....	272
FIGURA 4.26. POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (EN T CO2-EQ) DESAGREGADO EN LAS DISTINTAS ETAPAS DE LA VIDA ÚTIL DE LOS EDIFICIOS ANALIZADOS .....	273
FIGURA 4.27. POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL EN LOS DISTINTOS ASPECTOS DEL CICLO DE VIDA DE LOS EDIFICIOS ANALIZADOS: RESIDENCIAL N° 1 (ARRIBA), RESIDENCIAL N° 2 (CENTRO), OFICINAS/I+D (ABAJO).....	274
FIGURA 4.28. POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (EN T CO2-EQ) EN LA FABRICACIÓN DE LOS DISTINTOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DEL EDIFICIO RESIDENCIAL N°1 (ARRIBA IZQDA.), N° 2 (ARRIBA DCHA.), Y OFICINAS/I+D (ABAJO) .275	
FIGURA 4.29. HUELLA HÍDRICA (EN DM3) DESAGREGADA EN LAS DISTINTAS ETAPAS DE LA VIDA ÚTIL DE LOS EDIFICIOS ANALIZADOS .....	276
FIGURA 4.30. HUELLA HÍDRICA (EN M3) EN LA FABRICACIÓN DE LOS DISTINTOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DEL EDIFICIO RESIDENCIAL N° 1 (ARRIBA IZQDA.), N° 2 (ARRIBA DCHA.), Y OFICINAS/I+D (ABAJO).....	277
FIGURA 4.31. PUNTUACIÓN ÚNICA (EN PT) DESAGREGADA POR CATEGORÍAS DE IMPACTO EN LAS DISTINTAS ETAPAS DE LA VIDA ÚTIL DEL EDIFICIO RESIDENCIAL N° 1 .....	278
FIGURA 4.32. PUNTUACIÓN ÚNICA (EN PT) DESAGREGADA POR CATEGORÍAS DE IMPACTO EN LAS DISTINTAS ETAPAS DE LA VIDA ÚTIL DEL EDIFICIO RESIDENCIAL N° 2 .....	278
FIGURA 4.33. PUNTUACIÓN ÚNICA (EN PT) DESAGREGADA POR CATEGORÍAS DE IMPACTO EN LAS DISTINTAS ETAPAS DE LA VIDA ÚTIL DEL EDIFICIO DE OFICINAS/I+D .....	279
FIGURA 4.34. PUNTUACIÓN ÚNICA EN LOS DISTINTOS ASPECTOS DEL CICLO DE VIDA DE LOS EDIFICIOS ANALIZADOS: RESIDENCIAL N° 1 (ARRIBA), RESIDENCIAL N° 2 (CENTRO), OFICINAS/I+D (ABAJO).....	280

FIGURA 4.35. COMPARACIÓN DEL IMPACTO EN ENERGÍA INCORPORADA EN LOS EDIFICIOS ANALIZADOS MEDIANTE EL ACV COMPLETO Y EL ACV SIMPLIFICADO ...	281
FIGURA 4.36. COMPARACIÓN DEL IMPACTO EN POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL EN LOS EDIFICIOS ANALIZADOS MEDIANTE EL ACV COMPLETO Y EL ACV SIMPLIFICADO .....	281
FIGURA 4.37. ENERGÍA PRIMARIA INCORPORADA (EN MJ-EQ) Y PUNTUACIÓN ÚNICA (EN MPT) DE 1 M3 DE AGUA POTABLE DESDE CAPTACIÓN HASTA EL USUARIO .....	283
FIGURA 4.38. FORMULARIO UTILIZADO PARA LA ENCUESTA DE MOVILIDAD URBANA EN LOS EDIFICIOS RESIDENCIALES DE VALDESPARTERA (IZQDA.) Y EN EL EDIFICIO CIRCE (DCHA.) .....	287
FIGURA 4.39. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL NÚMERO DE VEHÍCULOS EN UNA VIVIENDA TIPO .....	288
FIGURA 4.40. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL NÚMERO DE TURISMOS Y BICICLETAS EN UNA VIVIENDA TIPO .....	288
FIGURA 4.41. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL NÚMERO DE KILÓMETROS DIARIOS TOTALES REALIZADOS ENTRE LA VIVIENDA Y EL TRABAJO .....	289
FIGURA 4.42. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL NÚMERO DE KILÓMETROS SEMANALES TOTALES REALIZADOS ENTRE LA VIVIENDA Y EL TRABAJO .....	290
FIGURA 4.43. IMPACTO DE LA MOVILIDAD EN EL CICLO DE VIDA DEL EDIFICIO RESIDENCIAL Nº 1 (IZQDA.) Y DEL EDIFICIO RESIDENCIAL Nº 2 (DCHA.), EVALUADOS EN TÉRMINOS DE POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL .....	291
FIGURA 4.44. DESPLAZAMIENTOS DEL PERSONAL DE CIRCE ENTRE SU DOMICILIO Y EL EDIFICIO CIRCE .....	292
FIGURA 4.45. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE LOS KILÓMETROS ANUALES POR TIPO DE COMBUSTIBLE UTILIZADO .....	293
FIGURA 4.46. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL NÚMERO DE KILÓMETROS DIARIOS TOTALES REALIZADOS ENTRE EL DOMICILIO Y EL EDIFICIO CIRCE .....	293
FIGURA 4.47. DISTRIBUCIÓN DEL IMPACTO EN ENERGÍA INCORPORADA (EN GJ-EQ/AÑO Y %) EN LA MOVILIDAD DE LOS OCUPANTES .....	294
FIGURA 4.48. DISTRIBUCIÓN DEL IMPACTO EN POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (EN T CO <sub>2</sub> -EQ/AÑO Y %) EN LA MOVILIDAD DE LOS OCUPANTES .....	294
FIGURA 4.49. IMPACTO DE LA MOVILIDAD EN EL CICLO DE VIDA DEL EDIFICIO CIRCE, EVALUADO EN TÉRMINOS DE ENERGÍA INCORPORADA (IZQDA.) Y POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (DCHA.) .....	295
FIGURA 4.50. ENERGÍA PRIMARIA ANUALIZADA DIRECTA E INDIRECTA EN LOS EDIFICIOS RESIDENCIALES .....	296
FIGURA 4.51. IMPACTO DEL POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL DEL CICLO DE VIDA GLOBAL EN LOS TRES EDIFICIOS ANALIZADOS .....	297
FIGURA 5.1. ZONAS CLIMÁTICAS DE INVIERNO Y VERANO SEGÚN CTE-DB-HE1 ..	306
FIGURA 5.2. ZONAS CLIMÁTICAS SEGÚN CTE-DB-HE1 Y ZONAS SELECCIONADAS .....	307
FIGURA 5.3. DISTINTAS PERSPECTIVAS DEL MODELO DE VIVIENDA UNIFAMILIAR .....	307

FIGURA 5.4. ZONIFICACIÓN DE LAS PLANTAS BAJA Y PRIMERA DE LA VIVIENDA UNIFAMILIAR .....	308
FIGURA 5.5. SISTEMAS DE AGUA CALIENTE SANITARIA, CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN EN LA VIVIENDA .....	310
FIGURA 5.6. DISTINTAS PERSPECTIVAS DEL MODELO DE BLOQUE DE VIVIENDAS .....	310
FIGURA 5.7. ZONIFICACIÓN DE LAS PLANTAS 1-5 DEL BLOQUE DE VIVIENDAS ...	311
FIGURA 5.8. DISTRIBUCIÓN DE UNA VIVIENDA DEL EDIFICIO .....	311
FIGURA 5.9. CONSUMOS DE ENERGÍA FINAL PARA DISTINTAS ORIENTACIONES DE LA FACHADA PRINCIPAL DE LA VIVIENDA UNIFAMILIAR (IZQDA.) Y DEL BLOQUE DE VIVIENDAS (DCHA.) EN MADRID .....	315
FIGURA 5.10. CONSUMOS DE ENERGÍA FINAL PARA DISTINTAS ORIENTACIONES DE LA FACHADA PRINCIPAL DE LA VIVIENDA UNIFAMILIAR (IZQDA.) Y DEL BLOQUE DE VIVIENDAS (DCHA.) EN BURGOS .....	315
FIGURA 5.11. CONSUMOS DE ENERGÍA FINAL PARA DISTINTAS ORIENTACIONES DE LA FACHADA PRINCIPAL DE LA VIVIENDA UNIFAMILIAR (IZQDA.) Y DEL BLOQUE DE VIVIENDAS (DCHA.) EN SEVILLA .....	315
FIGURA 5.12. MONITORIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LAS VIVIENDAS DE BARRIO GOYA –ZARAGOZA.....	318
FIGURA 5.13. INFILTRACIÓN DE AIRE EN UNA VIVIENDA .....	318
FIGURA 5.14. CONSUMOS DE ENERGÍA FINAL PARA DISTINTAS TASAS DE RENOVACIONES-HORA DE LA VIVIENDA UNIFAMILIAR .....	318
FIGURA 5.15. CONSUMOS DE ENERGÍA FINAL PARA DISTINTAS TASAS DE RENOVACIONES-HORA DEL BLOQUE DE VIVIENDAS.....	319
FIGURA 5.16. FACTOR DE CORRECCIÓN DEL RENDIMIENTO DE DISTINTOS TIPOS DE CALDERA EN FUNCIÓN DEL FACTOR DE CARGA PARCIAL.....	320
FIGURA 5.17. CONSUMOS DE ENERGÍA FINAL, ENERGÍA PRIMARIA Y EMISIONES EQUIVALENTES DE CO2 PARA DISTINTAS COMBINACIONES DE SISTEMAS ENERGÉTICOS DE LA VIVIENDA UNIFAMILIAR EN MADRID .....	320
FIGURA 5.18. PROCESO DEL ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO.....	324
FIGURA 5.19. REPRESENTACIÓN SOBRE EL DIAGRAMA PSICROMÉTRICO DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO.....	324
FIGURA 5.20. CONSUMOS DE ENERGÍA FINAL PARA REFRIGERACIÓN MEDIANTE COMPRESIÓN DE REFRIGERANTE Y ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO EN LA VIVIENDA UNIFAMILIAR (IZQDA.) Y EN EL BLOQUE DE VIVIENDAS (DCHA.).....	325
FIGURA 5.21. SUPERFICIE ACRISTALADA DE LA TORRE DEL AGUA (IZQDA.) EN LA “EXPO ZARAGOZA 2008 - AGUA Y DESARROLLO SOSTENIBLE” Y FUTURO PARQUE EMPRESARIAL EN EL RECINTO DE LA EXPO (DCHA.) .....	326
FIGURA 5.22. RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE PARA UNA LATITUD DE 40°N PARA DISTINTAS ORIENTACIONES DE LOS HUECOS DE FACHADA Y PARA CUBIERTA HORIZONTAL .....	326
FIGURA 5.23. ENERGÍA PRIMARIA INCORPORADA Y EMISIONES EQUIVALENTES DE CO2 ASOCIADAS A LA FABRICACIÓN, TRANSPORTE Y DISPOSICIÓN FINAL DE 1 M2 DE DISTINTOS TIPOS DE VIDRIOS.....	327

FIGURA 5.24. ENERGÍA PRIMARIA INCORPORADA Y EMISIONES EQUIVALENTES DE CO2 ASOCIADAS A LA FABRICACIÓN, TRANSPORTE Y DISPOSICIÓN FINAL DE 1 M2 DE DISTINTOS TIPOS DE MARCOS DE VENTANAS.....	327
FIGURA 5.25. EMISIONES EQUIVALENTES DE CO2 ASOCIADAS A LA FABRICACIÓN, TRANSPORTE Y DISPOSICIÓN FINAL DE 1 M2 DE DISTINTOS TIPOS DE VENTANAS ....	328
FIGURA 5.26. CONSUMO DE ENERGÍA FINAL EN KWH/M2 Y AÑO CON DISTINTOS VIDRIOS Y MARCO DE MADERA PARA LA VIVIENDA UNIFAMILIAR (IZQDA.) Y EL BLOQUE DE VIVIENDAS (DCHA.) EN MADRID.....	328
FIGURA 5.27. COMPARACIÓN DEL IMPACTO ENERGÉTICO Y MEDIOAMBIENTAL DE LOS MATERIALES CON Y SIN PARKING SUBTERRÁNEO EN LA VIVIENDA UNIFAMILIAR (IZQDA.) Y EN EL BLOQUE DE VIVIENDAS (DCHA.) .....	330
FIGURA 5.28. CONSUMOS DE ENERGÍA FINAL PARA CLIMATIZACIÓN EN LA VIVIENDA UNIFAMILIAR (IZQDA.) Y EN EL BLOQUE DE VIVIENDAS (DCHA.) ADOSADOS Y SIN ADOSAR .....	331
FIGURA 5.29. EVOLUCIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA FINAL EN FUNCIÓN DEL INCREMENTO EN EL ESPESOR DE AISLAMIENTO DE LOS CERRAMIENTOS DE LA VIVIENDA UNIFAMILIAR .....	333
FIGURA 5.30. EVOLUCIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA FINAL EN FUNCIÓN DEL INCREMENTO EN EL ESPESOR DE AISLAMIENTO DE LOS CERRAMIENTOS DEL BLOQUE DE VIVIENDAS.....	333
FIGURA 5.31. COMPARACIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA FINAL DE LA VIVIENDA UNIFAMILIAR SIN AISLAR Y CON EL AISLAMIENTO MÍNIMO ESTABLECIDO POR LA NORMATIVA VIGENTE .....	334
FIGURA 5.32. EVOLUCIÓN DE LAS EMISIONES EQUIVALENTES DE CO2 DEL EDIFICIO EN FUNCIÓN DEL INCREMENTO EN EL ESPESOR DE AISLAMIENTO DE LOS CERRAMIENTOS DE LA VIVIENDA UNIFAMILIAR .....	335
FIGURA 5.33. EVOLUCIÓN DE LAS EMISIONES EQUIVALENTES DE CO2 DEL EDIFICIO EN FUNCIÓN DE LA INVERSIÓN EN AISLAR LOS CERRAMIENTOS DE LA VIVIENDA UNIFAMILIAR .....	336
FIGURA 5.34. CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA EN KWH/M2AÑO (IZQDA.) Y EMISIONES EQUIVALENTES EN KG CO2/M2AÑO (DCHA.) PARA DISTINTOS TIPOS DE MATERIALES AISLANTES EN LA VIVIENDA UNIFAMILIAR EN MADRID.....	338
FIGURA 5.35. CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA EN KWH/M2AÑO (IZQDA.) Y EMISIONES EQUIVALENTES EN KG CO2/M2AÑO (DCHA.) PARA LAS SOLUCIONES LADRILLO+AISLANTE Y BLOQUE CERÁMICO+AISLANTE EN LA VIVIENDA UNIFAMILIAR EN MADRID.....	340
FIGURA 5.36. CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA EN KWH/M2AÑO (IZQDA.) Y EMISIONES EQUIVALENTES EN KG CO2/M2AÑO (DCHA.) PARA LAS SOLUCIONES LADRILLO+AISLANTE Y BLOQUE CERÁMICO+AISLANTE EN EL BLOQUE DE VIVIENDAS EN MADRID.....	340
FIGURA 5.37. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DEL PICO DE DEMANDA DE REFRIGERACIÓN EN UN BLOQUE DE VIVIENDAS CON CUBIERTA VEGETAL.....	342
FIGURA 5.38. CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA EN KWH/M2AÑO (IZQDA.) Y EMISIONES EQUIVALENTES EN KG CO2/M2AÑO (DCHA.) PARA CUBIERTA CONVENCIONAL Y CUBIERTA VEGETAL EN LA VIVIENDA UNIFAMILIAR EN SEVILLA .....	343

FIGURA 5.39. CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA EN KWH/M2AÑO (IZQDA.) Y EMISIONES EQUIVALENTES EN KG CO2/M2AÑO (DCHA.) PARA CUBIERTA CONVENCIONAL Y CUBIERTA VEGETAL EN EL BLOQUE DE VIVIENDAS EN SEVILLA .....	344
FIGURA 5.40. IMPACTO ENERGÉTICO Y MEDIOAMBIENTAL DE LOS MATERIALES EN LA VIVIENDA UNIFAMILIAR (IZQDA.) Y EN EL BLOQUE DE VIVIENDAS (DCHA.) CON PRODUCTOS DE CEMENTO Y HORMIGÓN A BASE DE CLÍNKER CONVENCIONAL Y DE CLÍNKER DE MENOR IMPACTO .....	345
FIGURA 5.41. RELACIÓN ENTRE LA COMPACIDAD Y LAS PÉRDIDAS EN LOS EDIFICIOS .....	346
FIGURA 5.42. CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA EN KWH/AÑO (IZQDA.) Y EMISIONES EQUIVALENTES EN KG CO2/AÑO (DCHA.) PARA LA VIVIENDA UNIFAMILIAR INICIAL Y CON UN 20% MÁS DE SUPERFICIE EN MADRID .....	347
FIGURA 5.43. TRANSPORTE DE MATERIAS PRIMAS DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE LA VIVIENDA UNIFAMILIAR (IZQDA.) Y SU IMPACTO DEL CICLO DE VIDA EN ENERGÍA PRIMARIA Y POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (DCHA.) .....	348
FIGURA 5.44. TRANSPORTE DE MATERIAS PRIMAS DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DEL BLOQUE DE VIVIENDAS (IZQDA.) Y SU IMPACTO DEL CICLO DE VIDA EN ENERGÍA PRIMARIA Y POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (DCHA.) .....	348
FIGURA 5.45. DEMANDA DE ENERGÍA PRIMARIA ACUMULADA (ARRIBA) Y EMISIONES EQUIVALENTES DE CO2 (ABAJO) EN EL CICLO DE VIDA DE DISTINTOS MEDIOS DE TRANSPORTE URBANO .....	350
FIGURA 5.46. DEMANDA ANUAL DE ENERGÍA PRIMARIA ACUMULADA (ARRIBA) Y EMISIONES ANUALES EQUIVALENTES DE CO2 (ABAJO) EN EL CICLO DE VIDA DE LA VIVIENDA UNIFAMILIAR EN MADRID .....	351
FIGURA 5.47. CURVA AHORRO DIRECTO DE ENERGÍA FINAL EN LA ETAPA DE USO DEL EDIFICIO – INVERSIÓN .....	356
FIGURA 5.48. CURVA DISMINUCIÓN DE DEMANDA DE ENERGÍA PRIMARIA ACUMULADA – INVERSIÓN .....	356
FIGURA 5.49. CURVA DISMINUCIÓN DE EMISIONES EQUIVALENTES DE CO2 ACUMULADAS – INVERSIÓN .....	357
FIGURA 5.50. ORDENACIÓN DE LAS MEDIDAS PARA LA DISMINUCIÓN DE EMISIONES EQUIVALENTES DE CO2 .....	358
FIGURA 5.51. EVOLUCIÓN DEL COSTE DE LAS EMISIONES EQUIVALENTES DE CO2 EVITADAS PARA LA CURVA “MEDIO” EN FUNCIÓN DE LAS MEDIDAS IMPLEMENTADAS .....	359
FIGURA 5.52. CURVA “MEDIO” DE DISMINUCIÓN DE EMISIONES EQUIVALENTES DE CO2 ACUMULADAS – INVERSIÓN ELIMINANDO LA MEDIDA Nº1 .....	359
FIGURA 5.53. CURVA “MEDIO” DE DISMINUCIÓN DE EMISIONES EQUIVALENTES DE CO2 ACUMULADAS – INVERSIÓN, ORDENADAS DE MAYOR A MENOR, EN FUNCIÓN DE LA DISMINUCIÓN DE EMISIONES OBTENIDA .....	360
FIGURA 5.54. CURVA “MEDIO” DE DISMINUCIÓN DE EMISIONES EQUIVALENTES DE CO2 ACUMULADAS – INVERSIÓN, ORDENADAS DE MENOR A MAYOR, EN FUNCIÓN DE LA INVERSIÓN NECESARIA .....	361



# INDICE DE TABLAS

TABLA 1.1.	EVOLUCIÓN DEL PARQUE DE VIVIENDAS EN EL PERIODO 1991-2001 Y DISTRIBUCIÓN DEL TIPO DE VIVIENDAS EN 2001.....	11
TABLA 1.2.	PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL ESTÁNDAR “PASSIVE HOUSE”.....	25
TABLA 1.3.	RESUMEN DE MEDIDAS CONTEMPLADAS EN EL PLAN DE ACCIÓN 2008-2012 DE LA E4 PARA EL SECTOR DE LA EDIFICACIÓN .....	30
TABLA 1.4.	COMPARATIVA DE LAS ESCALAS DE CALIFICACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA .....	33
TABLA 1.5.	OBJETIVOS CUANTITATIVOS ESPECÍFICOS SOBRE RCD DEL PNIR 2008-2015 .....	34
TABLA 2.1.	ETAPAS DEL CICLO DE VIDA DE UN EDIFICIO SEGÚN EL ESTÁNDAR CEN/TC 350 .....	65
TABLA 2.2.	CATEGORÍAS DE IMPACTO SUGERIDAS PARA ACV EN EDIFICIOS .....	65
TABLA 2.3.	BASES DE DATOS PARA ESTUDIOS DE ACV .....	72
TABLA 2.4.	DECLARACIONES AMBIENTALES DE PRODUCTO A NIVEL MUNDIAL.....	76
TABLA 2.5.	INDICADORES MEDIOAMBIENTALES UTILIZADOS EN EDIFICIOS .....	78
TABLA 2.6.	VALORES DE DISTINTOS INDICADORES MEDIOAMBIENTALES EN EUROPA .....	80
TABLA 2.7.	METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE IMPACTOS DEL CICLO DE VIDA ..	81
TABLA 2.8.	FACTORES DE CARACTERIZACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA DEMANDA DE ENERGÍA ACUMULADA.....	85
TABLA 2.9.	FACTORES DE PASO DE ENERGÍA FINAL A ENERGÍA PRIMARIA. ....	86
TABLA 2.10.	FACTORES DE PASO DE ENERGÍA FINAL A EMISIONES EQUIVALENTES DE CO <sub>2</sub> .....	87
TABLA 2.11.	FACTORES DE CARACTERIZACIÓN PARA EL CÁLCULO DEL POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL.....	88
TABLA 2.12.	PRINCIPALES FACTORES DE CARACTERIZACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LOS INDICADORES NUMÉRICOS DE LAS CATEGORÍAS DE IMPACTO DEL ECOINDICADOR 99.....	92
TABLA 2.13.	FACTORES DE CARACTERIZACIÓN DE DAÑOS PARA LA PERSPECTIVA H.....	93
TABLA 2.14.	FACTORES DE NORMALIZACIÓN Y PONDERACIÓN DE DAÑOS PARA LA PERSPECTIVA H.....	94
TABLA 2.15.	APLICACIONES DE ACV DE USO GENERAL (FUENTE: ARANDA A., 2009). 96	
TABLA 2.16.	APLICACIONES DE ACV ESPECÍFICAMENTE ADAPTADAS PARA SU USO EN EDIFICIOS .....	100
TABLA 2.17.	USUARIOS DE ACV PARA EDIFICIOS.....	108

TABLA 3.1.	ENTRADAS DESDE LA TECNOSFERA PARA LA PRODUCCIÓN DE 1 KWH EN ESPAÑA .....	119
TABLA 3.2.	MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN ANALIZADOS .....	122
TABLA 3.3.	DATOS DE INVENTARIO: PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE LADRILLO (VALOR DE CORTE=1%).....	123
TABLA 3.4.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE LADRILLO .....	124
TABLA 3.5.	DATOS DE INVENTARIO: PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE LADRILLO DE ARCILLA ALIGERADA .....	125
TABLA 3.6.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE LADRILLO DE ARCILLA ALIGERADA .....	125
TABLA 3.7.	DATOS DE INVENTARIO: PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE LADRILLO SILICO-CALCÁREO .....	126
TABLA 3.8.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE LADRILLO SILICO-CALCÁREO .....	127
TABLA 3.9.	DATOS DE INVENTARIO: PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE BALDOSA CERÁMICA .....	127
TABLA 3.10.	COMPOSICIÓN Y PROCEDENCIA DEL ATOMIZADO .....	128
TABLA 3.11.	CONSUMOS DE ENERGÍA FINAL EN PLANTA EN ECOINVENT COMPARADOS CON LOS OBTENIDOS EN LA EMPRESA ANALIZADA .....	131
TABLA 3.12.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE BALDOSA CERÁMICA .....	131
TABLA 3.13.	DATOS DE INVENTARIO: PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE BALDOSA DE HORMIGÓN .....	131
TABLA 3.14.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE BALDOSA DE HORMIGÓN.....	132
TABLA 3.15.	DATOS DE INVENTARIO: PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE TEJA CERÁMICA .....	133
TABLA 3.16.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE TEJA CERÁMICA .....	133
TABLA 3.17.	DATOS DE INVENTARIO: PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE TEJA DE HORMIGÓN.....	133
TABLA 3.18.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE TEJA DE HORMIGÓN .....	134
TABLA 3.19.	DATOS DE INVENTARIO: PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE TEJADO DE FIBROCEMENTO .....	134
TABLA 3.20.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE TEJADO DE FIBROCEMENTO.....	136
TABLA 3.21.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO TOTAL DEL CICLO DE VIDA DE PRODUCTOS CERÁMICOS (1 KG) FABRICADOS EN HORNOS TRADICIONALES DE LEÑA.....	139
TABLA 3.22.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO TOTAL DEL CICLO DE VIDA EN LOS DISTINTOS PRODUCTOS ANALIZADOS (1 KG) SUPONIENDO SU RECICLADO TOTAL.....	140



TABLA 3.23. DATOS DE INVENTARIO: PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE POLIESTIRENO EXPANDIDO .....	142
TABLA 3.24. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE POLIESTIRENO EXPANDIDO.....	142
TABLA 3.25. DATOS DE INVENTARIO: PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE ESPUMA RÍGIDA DE POLIURETANO.....	143
TABLA 3.26. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE ESPUMA RÍGIDA DE POLIURETANO .....	143
TABLA 3.27. DATOS DE INVENTARIO: PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE LANA DE ROCA .....	144
TABLA 3.28. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE LANA DE ROCA .....	145
TABLA 3.29. DATOS DE INVENTARIO: PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE CORCHO .....	146
TABLA 3.30. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE CORCHO.....	147
TABLA 3.31. DATOS DE INVENTARIO: PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE FIBRA DE CELULOSA.....	147
TABLA 3.32. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE FIBRA DE CELULOSA .....	148
TABLA 3.33. DATOS DE INVENTARIO: PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE LANA DE MADERA.....	148
TABLA 3.34. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE LANA DE MADERA .....	149
TABLA 3.35. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA EN LA ETAPA DE FABRICACIÓN DE 1 KG DE LANA DE OVEJA CON DISTINTOS LÍMITES DEL SISTEMA....	151
TABLA 3.36. EVALUACIÓN DEL IMPACTO TOTAL DEL CICLO DE VIDA DE DISTINTOS MATERIALES AISLANTES (1 KG) SUPONIENDO SU RECICLADO TOTAL .....	153
TABLA 3.37. EVALUACIÓN DEL IMPACTO TOTAL DEL CICLO DE VIDA DEL CORCHO (1 KG) UTILIZANDO RESINAS NATURALES .....	153
TABLA 3.38. EVALUACIÓN DEL IMPACTO TOTAL DEL CICLO DE VIDA DE FIBRA DE CELULOSA Y LANA DE ROCA (1 KG) MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE CALORES RESIDUALES .....	154
TABLA 3.39. PRODUCCIÓN DE CEMENTO Y CLÍNKER EN LOS AÑOS 2007 Y 2008. ....	155
TABLA 3.40. MATERIAS PRIMAS NECESARIAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE CLÍNKER .....	157
TABLA 3.41. COMBUSTIBLES NECESARIOS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE CLÍNKER .....	157
TABLA 3.42. TIPOS DE CEMENTO Y MATERIAS PRIMAS NECESARIAS POR KILOGRAMO DE CEMENTO. ....	158
TABLA 3.43. DATOS DE INVENTARIO: PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE CEMENTO.....	158

TABLA 3.44.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE CEMENTO .....	159
TABLA 3.45.	DATOS DE INVENTARIO: PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE MORTERO DE CEMENTO .....	159
TABLA 3.46.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE MORTERO DE CEMENTO .....	160
TABLA 3.47.	DATOS DE INVENTARIO: PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE HORMIGÓN NO ARMADO .....	161
TABLA 3.48.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE HORMIGÓN NO ARMADO .....	161
TABLA 3.49.	DATOS DE INVENTARIO: PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE HORMIGÓN ARMADO.....	162
TABLA 3.50.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE HORMIGÓN ARMADO .....	162
TABLA 3.51.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA ETAPA DE FABRICACIÓN DEL CLÍNKER (1 KG) SEGÚN DISTINTOS ESCENARIOS DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS.....	164
TABLA 3.52.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO TOTAL DEL CICLO DE VIDA EN LOS DISTINTOS PRODUCTOS ANALIZADOS (1KG) SEGÚN DISTINTOS ESCENARIOS DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS.....	164
TABLA 3.53.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO TOTAL DEL CICLO DE VIDA DEL HORMIGÓN (1 KG) SUPONIENDO SU RECICLADO TOTAL .....	166
TABLA 3.54.	DATOS DE INVENTARIO: PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE MADERA BLANDA ASERRADA SECADA EN HORNO Y CEPILLADA .....	168
TABLA 3.55.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE MADERA BLANDA ASERRADA SECADA EN HORNO Y CEPILLADA .....	168
TABLA 3.56.	DATOS DE INVENTARIO: PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE MADERA LAMINADA .....	169
TABLA 3.57.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE MADERA LAMINADA PARA USO EXTERIOR.....	170
TABLA 3.58.	DATOS DE INVENTARIO: PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE TABLERO DE MADERA AGLOMERADO.....	171
TABLA 3.59.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE TABLERO DE MADERA AGLOMERADO DE USO INTERIOR. NOTA: ENTRE PARÉNTESIS SE INDICAN LOS IMPACTOS EN CASO DE MADERA AGLOMERADA DE USO EXTERIOR, QUE COMO SE PUEDE OBSERVAR SON SUPERIORES.....	172
TABLA 3.60.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE TABLERO OSB .....	172
TABLA 3.61.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO TOTAL DEL CICLO DE VIDA DE LOS PRODUCTOS DE MADERA (1 KG) UTILIZANDO RESINAS NATURALES.....	174
TABLA 3.62.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO TOTAL DEL CICLO DE VIDA DE LA MADERA BLANDA ASERRADA (1 KG) SUSTITUYENDO SECADO EN HORNO POR SECADO NATURAL .....	174

TABLA 3.63.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO TOTAL DEL CICLO DE VIDA EN LOS DISTINTOS PRODUCTOS ANALIZADOS (1 KG) SUPONIENDO SU RECICLADO TOTAL.....	175
TABLA 3.64.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO TOTAL DEL CICLO DE VIDA DE LOS PRODUCTOS DE MADERA (1 KG) MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE CALORES RESIDUALES .....	175
TABLA 3.65.	DATOS DE INVENTARIO: PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE ACERO .....	178
TABLA 3.66.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE ACERO..	178
TABLA 3.67.	DATOS DE INVENTARIO: PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE ALUMINIO.....	181
TABLA 3.68.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE ALUMINIO .....	182
TABLA 3.69.	DATOS DE INVENTARIO: PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE COBRE .....	184
TABLA 3.70.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE COBRE ..	184
TABLA 3.71.	DATOS DE INVENTARIO: PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE PVC .....	185
TABLA 3.72.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE PVC.....	186
TABLA 3.73.	MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DEL VIDRIO PLANO .....	186
TABLA 3.74.	DATOS DE INVENTARIO: PRINCIPALES MATERIAS PRIMAS PARA LA FABRICACIÓN DE 1 KG DE VIDRIO PLANO .....	187
TABLA 3.75.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA DE 1 KG DE VIDRIO PLANO .....	188
TABLA 3.76.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA EN LA FABRICACIÓN DE METALES (ACERO, ALUMINIO Y COBRE) PRIMARIOS Y SECUNDARIOS.....	190
TABLA 3.77.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA TOTAL DE 1 KG DE METAL EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE PRODUCCIÓN DE METAL SECUNDARIO ....	190
TABLA 3.78.	COEFICIENTES PARA EL CÁLCULO DEL IMPACTO DE LA ETAPA DE TRANSPORTE PLANTA-OBRA .....	196
TABLA 3.79.	POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL EN LOS MATERIALES ANALIZADOS POR UNIDAD DE PESO (IZQDA.) Y POR UNIDAD DE VOLUMEN (DCHA.)..	213
TABLA 4.1.	RATIOS DE CANTIDADES DE RESIDUOS DE OBRA PRODUCIDOS.....	224
TABLA 4.2.	DESTINO DE LOS RESIDUOS DE OBRA PRODUCIDOS.....	224
TABLA 4.3.	ESPECIFICACIONES DE LOS TIPOS DE LÁMPARA CONSIDERADOS .....	226
TABLA 4.4.	DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES DEL VIENTO EN EL AEROPUERTO DE ZARAGOZA .....	228
TABLA 4.5.	NÚMERO DE HABITANTES EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE DORMITORIOS POR VIVIENDA.....	230
TABLA 4.6.	DEFINICIÓN DE LAS PLANTAS DEL EDIFICIO Nº 1 .....	235

TABLA 4.7.	NÚMERO DE PILARES EXISTENTES EN LAS DISTINTAS PLANTAS DE VIVIENDAS DEL EDIFICIO Nº1 SEGÚN LAS DIMENSIONES DE LOS PILARES.....	236
TABLA 4.8.	CÁLCULO DEL VOLUMEN TOTAL DE LOS PILARES DE LAS VIVIENDAS DEL EDIFICIO Nº 1.....	236
TABLA 4.9.	NÚMERO DE PILARES EXISTENTES EN EL SÓTANO-APARCAMIENTO DEL EDIFICIO Nº 1 SEGÚN LAS DIMENSIONES DE LOS PILARES .....	237
TABLA 4.10.	CÁLCULO DEL VOLUMEN TOTAL DE LOS PILARES DEL SÓTANO-APARCAMIENTO.....	237
TABLA 4.11.	INVENTARIO DE MATERIALES DE LA ESTRUCTURA DEL EDIFICIO Nº 1 .....	238
TABLA 4.12.	INVENTARIO DE MATERIALES DE LA ENVOLVENTE DEL EDIFICIO Nº 1 .....	239
TABLA 4.13.	NÚMERO INICIAL Y TIPOLOGÍA DE LÁMPARAS INSTALADAS EN EL EDIFICIO Nº 1 .....	240
TABLA 4.14.	IMPACTO ASOCIADO AL TRANSPORTE DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN EN EL EDIFICIO Nº 1 .....	241
TABLA 4.15.	IMPACTO ASOCIADO AL TRANSPORTE DE LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS DEL EDIFICIO Nº 1.....	241
TABLA 4.16.	CANTIDADES DE RESIDUOS DE OBRA PRODUCIDOS EN EL EDIFICIO Nº 1 .....	242
TABLA 4.17.	DEMANDA DE ENERGÍA PARA CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN DEL EDIFICIO Nº 1 .....	242
TABLA 4.18.	PROCESO DE CÁLCULO DEL CONSUMO DE ENERGÍA FINAL PARA ILUMINACIÓN DEL EDIFICIO Nº 1 .....	243
TABLA 4.19.	CONSUMOS DE ENERGÍA FINAL DEL EDIFICIO. * SE CONSIDERA LA SUPERFICIE ÚTIL CLIMATIZADA DEL EDIFICIO Nº 1.....	243
TABLA 4.20.	CONSUMOS TOTALES DE AGUA Y DE ACS DEL EDIFICIO Nº 1.....	243
TABLA 4.21.	NÚMERO Y TIPOLOGÍA DE LÁMPARAS A REPONER A LO LARGO DE LA VIDA ÚTIL DEL EDIFICIO Nº 1 .....	244
TABLA 4.22.	DEFINICIÓN DE LAS PLANTAS DEL EDIFICIO Nº 2.....	245
TABLA 4.23.	NÚMERO DE PILARES EXISTENTES EN LAS DISTINTAS PLANTAS DE VIVIENDAS DEL EDIFICIO Nº2 SEGÚN LAS DIMENSIONES DE LOS PILARES.....	245
TABLA 4.24.	CÁLCULO DEL VOLUMEN TOTAL DE LOS PILARES DE LAS VIVIENDAS DEL EDIFICIO Nº 2.....	245
TABLA 4.25.	NÚMERO DE PILARES EXISTENTES EN LOS SÓTANOS-APARCAMIENTOS DEL EDIFICIO Nº 2 SEGÚN LAS DIMENSIONES DE LOS PILARES .....	246
TABLA 4.26.	CÁLCULO DEL VOLUMEN TOTAL DE LOS PILARES DE LAS DOS PLANTAS DE SÓTANO-APARCAMIENTOS DEL EDIFICIO Nº 2.....	246
TABLA 4.27.	INVENTARIO DE MATERIALES DE LA ESTRUCTURA DEL EDIFICIO Nº 2 .....	247
TABLA 4.28.	INVENTARIO DE MATERIALES DE LA ENVOLVENTE DEL EDIFICIO Nº 2 .....	248

TABLA 4.29. NÚMERO INICIAL Y TIPOLOGÍA DE LÁMPARAS INSTALADAS EN EL EDIFICIO Nº 2 .....	249
TABLA 4.30. IMPACTO ASOCIADO AL TRANSPORTE DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DEL EDIFICIO Nº 2 .....	250
TABLA 4.31. IMPACTO ASOCIADO AL TRANSPORTE DE LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS DEL EDIFICIO Nº 2.....	250
TABLA 4.32. CANTIDADES DE RESIDUOS DE OBRA PRODUCIDOS EN EL EDIFICIO Nº 2 .....	251
TABLA 4.33. DEMANDA DE ENERGÍA PARA CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN DEL EDIFICIO Nº 2 .....	251
TABLA 4.34. PROCESO DE CÁLCULO DEL CONSUMO DE ENERGÍA FINAL PARA ILUMINACIÓN DEL EDIFICIO Nº 2 .....	252
TABLA 4.35. CONSUMOS DE ENERGÍA FINAL DEL EDIFICIO. * SE CONSIDERA LA SUPERFICIE ÚTIL CLIMATIZADA DEL EDIFICIO Nº 2 .....	252
TABLA 4.36. CONSUMOS TOTALES DE AGUA Y DE ACS DEL EDIFICIO Nº 2.....	252
TABLA 4.37. NÚMERO Y TIPOLOGÍA DE LÁMPARAS A REPONER A LO LARGO DE LA VIDA ÚTIL DEL EDIFICIO Nº2 .....	253
TABLA 4.38. INVENTARIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA Y CERRAMIENTOS DEL EDIFICIO CIRCE.....	258
TABLA 4.39. TIPOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS A INTEGRAR EN EL EDIFICIO CIRCE .....	259
TABLA 4.40. POTENCIA INSTALADA EN ILUMINACIÓN, NÚMERO INICIAL Y TIPOLOGÍA DE LÁMPARAS INSTALADAS EN EL EDIFICIO CIRCE.....	260
TABLA 4.41. IMPACTO ASOCIADO AL TRANSPORTE DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DEL EDIFICIO CIRCE .....	260
TABLA 4.42. IMPACTO ASOCIADO AL TRANSPORTE DE LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS DEL EDIFICIO CIRCE.....	260
TABLA 4.43. MOVIMIENTOS DE TIERRAS DESAGREGADOS POR PARTIDAS .....	261
TABLA 4.44. CANTIDADES DE RESIDUOS DE OBRA PRODUCIDAS EN EL EDIFICIO CIRCE .....	261
TABLA 4.45. DEMANDA DE ENERGÍA PARA CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN DEL EDIFICIO CIRCE.....	262
TABLA 4.46. CONSUMOS DE ENERGÍA FINAL DEL EDIFICIO CIRCE.....	262
TABLA 4.47. CONSUMO DE ENERGÍA FINAL PARA CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN DEL EDIFICIO CIRCE.....	263
TABLA 4.48. PRODUCCIÓN ANUAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	264
TABLA 4.49. PRODUCCIÓN ANUAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA DEL AEROGENERADOR .....	265
TABLA 4.50. PRODUCCIÓN DE ENERGÍA FINAL PROCEDENTE DE SISTEMAS RENOVABLES EN EL EDIFICIO CIRCE. ....	266

TABLA 4.51. CONSUMOS DE TOTALES DE AGUA, Y DE ACS PARA EL EDIFICIO CIRCE .....	266
TABLA 4.52. POTENCIA, NÚMERO Y TIPOLOGÍA DE LÁMPARAS A REPONER A LO LARGO DE LA VIDA ÚTIL DEL EDIFICIO CIRCE.....	267
TABLA 4.53. RATIOS DE ENERGÍA INCORPORADA EN LAS DISTINTAS ETAPAS DE LA VIDA DE LOS EDIFICIOS ANALIZADOS .....	269
TABLA 4.54. FRACCIÓN RENOVABLE (EN %) DE LA ENERGÍA INCORPORADA EN LA FABRICACIÓN DE LOS DISTINTOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN EN LOS EDIFICIO RESIDENCIALES N° 1 (IZQDA.) Y N° 2 (DCHA.) .....	271
TABLA 4.55. FRACCIÓN RENOVABLE (EN %) DE LA ENERGÍA INCORPORADA EN LA FABRICACIÓN DE LOS DISTINTOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DEL EDIFICIO DE OFICINAS/I+D .....	272
TABLA 4.56. RATIOS DE POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL EN LAS DISTINTAS ETAPAS DE LA VIDA DE LOS EDIFICIOS ANALIZADOS .....	273
TABLA 4.57. RATIOS DE HUELLA HÍDRICA EN LAS DISTINTAS ETAPAS DE LA VIDA DE LOS EDIFICIOS ANALIZADOS .....	276
TABLA 4.58. RATIOS DE PUNTUACIÓN ÚNICA EN LAS DISTINTAS ETAPAS DE LA VIDA DE LOS EDIFICIOS ANALIZADOS.....	279
TABLA 4.59. ENERGÍA PRIMARIA INCORPORADA Y POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL DE LAS INFRAESTRUCTURAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE .....	284
TABLA 4.60. ENERGÍA PRIMARIA INCORPORADA Y POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL DE LAS INFRAESTRUCTURAS DE SUMINISTRO ENERGÉTICO .....	285
TABLA 4.61. ENERGÍA PRIMARIA INCORPORADA Y POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL DE LAS ACERAS Y CALZADAS .....	285
TABLA 4.62. IMPACTO ENERGÉTICO Y AMBIENTAL DE LA MOVILIDAD VIVIENDA-TRABAJO EN UN AÑO.....	290
TABLA 4.63. IMPACTO ENERGÉTICO Y AMBIENTAL DE LA MOVILIDAD VIVIENDA-COMERCIO/OCIO EN UN AÑO .....	291
TABLA 4.64. TIPO DE VEHÍCULO UTILIZADO EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA DEL DOMICILIO AL EDIFICIO CIRCE .....	292
TABLA 4.65. PROMEDIO TOTAL DE TRAYECTOS DIARIOS REALIZADOS SEGÚN LA DISTANCIA AL DOMICILIO .....	293
TABLA 4.66. NÚMERO TOTAL DE KILÓMETROS ANUALES POR TIPO DE VEHÍCULO .....	294
TABLA 5.1. DEFINICIÓN GEOMÉTRICA DE LOS ESPACIOS DE LA VIVIENDA UNIFAMILIAR .....	308
TABLA 5.2. INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA DEL MODELO DE VIVIENDA UNIFAMILIAR EN MADRID Y SEVILLA.....	309
TABLA 5.3. DEFINICIÓN GEOMÉTRICA DE LOS ESPACIOS DEL BLOQUE DE VIVIENDAS .....	311
TABLA 5.4. INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA DEL MODELO DE BLOQUE DE VIVIENDAS EN MADRID .....	312
TABLA 5.5. CÁLCULO DEL NÚMERO DE RENOVACIONES HORA REQUERIDO PARA EL MODELO DE VIVIENDA UNIFAMILIAR.....	317

---

TABLA 5.6. MODELIZACIÓN DE LA ENERGÍA PRIMARIA INCORPORADA (EN KWH/M2 AÑO) Y LAS EMISIONES ASOCIADAS A LOS MATERIALES (EN KG CO2/M2 AÑO) DE LA VIVIENDA UNIFAMILIAR .....	335
TABLA 5.7. ESPESOR DE MATERIAL AISLANTE PARA GARANTIZAR LA MISMA TRANSMISIVIDAD DE LOS CERRAMIENTOS DE LA VIVIENDA UNIFAMILIAR.....	337
TABLA 5.8. ESPESOR DE MATERIAL AISLANTE PARA GARANTIZAR LA MISMA TRANSMISIVIDAD DE LOS CERRAMIENTOS DE LA VIVIENDA UNIFAMILIAR.....	339
TABLA 5.9. ESPESOR DE MATERIAL AISLANTE PARA GARANTIZAR LA MISMA TRANSMISIVIDAD DE LOS CERRAMIENTOS DEL BLOQUE DE VIVIENDAS .....	339
TABLA 5.10. COMPOSICIÓN DE LA CUBIERTA VEGETAL EN LA VIVIENDA UNIFAMILIAR DE MADRID Y SEVILLA.....	343
TABLA 5.11. IMPACTO GLOBAL DEL TRANSPORTE DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN EN LOS MODELOS DE EDIFICIOS ANALIZADOS .....	348
TABLA 5.12. POTENCIAL DE DISMINUCIÓN DE IMPACTOS ENERGÉTICOS Y AMBIENTALES EN VIVIENDAS UNIFAMILIARES.....	354
TABLA 5.13. POTENCIAL DE DISMINUCIÓN DE IMPACTOS ENERGÉTICOS Y AMBIENTALES EN BLOQUES DE VIVIENDAS .....	355
TABLA 5.14. MODELADO DE LAS CURVAS AHORRO - INVERSIÓN.....	357

