

CAPÍTULO 6

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS AMBIENTAL SEGÚN EL CIERRE DEL CICLO DE LOS MATERIALES



Cuatro tipos constructivos a estudiar: convencional y modulares de hormigón, madera y acero.

6.1 Planteamiento del estudio

En el presente capítulo el objetivo es determinar una metodología para el análisis de impacto ambiental y el cierre de los ciclos materiales aplicable al objeto de estudio -el edificio modular- definido en el capítulo anterior.

Esta metodología debe permitir, en los siguientes capítulos 7 y 8, definir la solución arquitectónica que más se ajuste a las demandas de la sostenibilidad dentro del espectro considerado: un prototipo de edificio de viviendas desmontable compuesto por unidades modulares en el que se haya reducido al máximo posible su impacto ambiental, en cuanto a la afectación de recursos y la contaminación del medio, para luego serle aplicadas estrategias de gestión para el cierre de los ciclos materiales.

Para ello se comenzará por realizar un análisis del impacto ambiental basado en el análisis de ciclo de vida resumido, empleando como indicadores principales al consumo de materiales y energía así como generación de residuos diversos, referido a un edificio de vivienda plurifamiliar tipo, representativo de las soluciones tipológicas estándar en España¹. Las comparaciones que sobre él se formulen se harán sobre un mismo nivel de prestaciones básicas: superficie útil, usos, funcionalidad, resistencia estructural y comportamiento térmico.

De este edificio serán estudiadas cuatro versiones, la primera de ellas con el sistema que podría denominarse como construcción convencional² o representativa del modo habitual de construir en el ámbito geográfico en que esta investigación se realiza y las tres restantes con unidades modulares fabricadas con distintos materiales. Para las versiones modulares han sido escogidos los materiales más usuales en la construcción ligera, el acero y la madera, aunque a efectos de ampliar el universo de referencia de la prefabricación se incluye también otro material muy utilizado, el hormigón armado.

Una vez conocido el impacto ambiental producido durante el ciclo de vida de las cuatro versiones del edificio plurifamiliar tipo será posible contrastarlas, así como también compararlas con estudios ya realizados sobre otros tipos de edificación de vivienda³, a efectos de poder determinar sus principales problemas y limitaciones ambientales. Todo ello se realizará en dos niveles de contexto, el propio del edificio de estudio y el del sector de la edificación de vivienda en Cataluña.

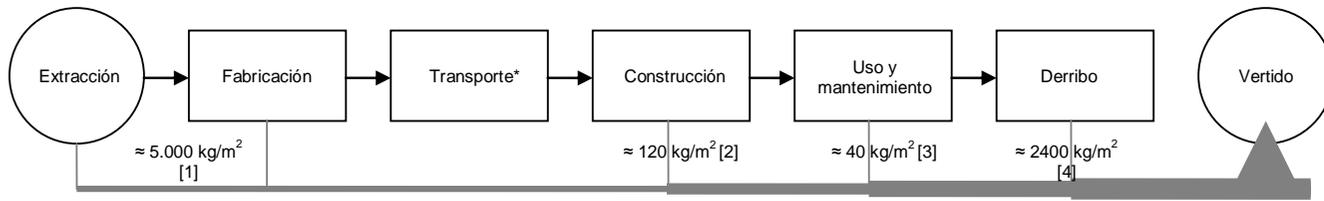
A partir de estas consideraciones se estudiarán diferentes alternativas constructivas y, en forma complementaria, de instalaciones, que permitan reducir el impacto ambiental. Estas oportunidades ambientales darán lugar a la aplicación de modificaciones sobre las configuraciones iniciales en las que este estudio se centra -es decir las modulares ligeras- con la intención de determinar un prototipo optimizado.

Ha sido dicho antes que este estudio intenta superar las estrategias ambientales paliativas, o de la disminución del impacto ambiental, para aproximarse a las estrategias ambientales definitivas, o del cierre de los ciclos materiales. Esto último lleva a considerar una nueva dimensión de estudio, que es la gestión de los recursos más allá del ciclo de vida del edificio, desde el origen de los recursos en la industria extractiva hasta su proceso final en la industria del reciclaje, a ser abordada en el capítulo 9.

Será entonces cuando se estudie la industrialización y la comercialización del prototipo bajo las exigencias del ciclo cerrado de los materiales, determinando para cada uno de ellos proveedores, usos, posibilidades de reutilización y rehabilitación y, finalmente, recicladores de materiales que aseguren su gestión cíclica sin que salgan nunca del sistema técnico.

El esquema de fases del ciclo de vida a analizar se sintetiza en el siguiente cuadro que, además, esquematiza los potenciales cambios que respecto de los flujos materiales y el cierre de sus ciclos podrían establecerse.

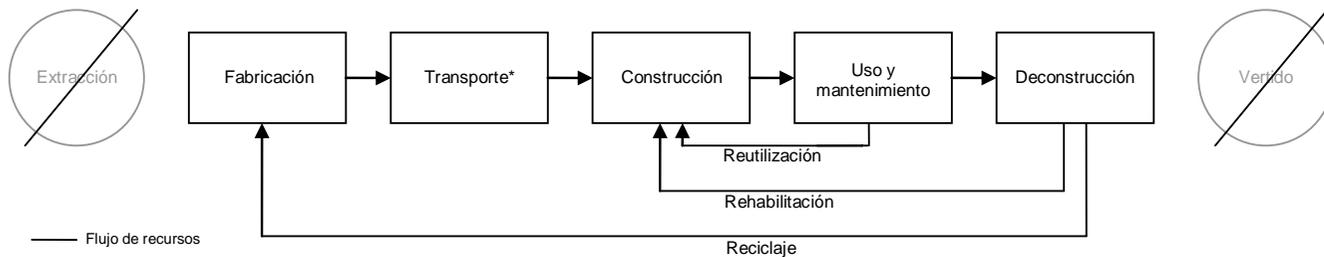
CONSTRUCCIÓN CONVENCIONAL



— Flujo de recursos — Flujo de residuos

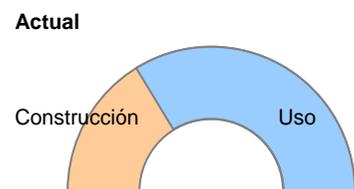
[1] MIPS abiótico y biótico menos materiales de construcción [2] Residuos de obra según ficha de residuos COAC [3] Cálculos propios [4] Materiales de construcción según banco PR/PCT ITeC

PROPUESTA DE CONSTRUCCIÓN MODULAR EN BASE A EDIFICIOS DESMONTABLES Y DE ALQUILER



— Flujo de recursos

6.2 Impacto ambiental, ACV resumido



Posible evolución del impacto ambiental de las fases de construcción y uso, según los indicadores de consumo de energía y emisiones de CO₂. La aplicación de las normativas de eficiencia energética derivadas de la directiva europea 2002/91/CE reduce la participación relativa del uso. El sistema de certificación LEED prevé, hacia 2030, que el nivel de calificación Platinum se otorgue a edificios con captación de energía renovable mayor que su gasto energético.

La metodología del análisis de ciclo de vida que se tendrá en cuenta como referencia para definir la evaluación ambiental que se llevará a cabo en los capítulos 7 y 8, en adelante ACV, [SETAC 2003], [A. Aranda et al.2006], [Fullana, Puig, 1997] establecida por las normas ISO 14040/43⁴ permite cuantificar el impacto medioambiental global realizando una contabilidad completa del consumo de recursos y de la emisión de residuos asociados al ciclo de vida total del edificio, resumiéndose sus fases en extracción-fabricación de materiales, transporte, construcción, uso y mantenimiento, derribo o desconstrucción y disposición final de residuos. No obstante, las metodologías y herramientas relacionadas con el ACV de los edificios no son suficientemente conocidas ni utilizadas entre los agentes del sector de la construcción: promotores, constructores, proyectistas, autoridades locales y propietarios de los edificios. La complejidad de su aplicación en una industria de las características de la construcción⁵, el tiempo que requiere su desarrollo respecto de los plazos de realización del proyecto de los edificios y la elevada inversión económica que requeriría su aplicación en ellos con las herramientas y metodologías actualmente disponibles⁶, que no se encuentran adaptadas a las características específicas del sector en España, hace que su implantación sea difícil.

A partir de ello los pocos estudios de ACV sobre edificios que se realizan en España⁷ han debido simplificar significativamente la metodología empleada así como realizar diversas adaptaciones y aproximaciones respecto de los datos disponibles en las fuentes de información, que en su mayoría proceden de otros países de Europa o del resto del mundo y tal como se ha dicho no pueden extrapolarse directamente a la situación local. Estos ACV habitualmente se realizan en base a unos pocos indicadores de impacto ambiental⁸ y profundizan el estudio sólo en las fases de extracción y fabricación de materiales, por una parte, y de uso y mantenimiento del edificio, por la otra. Los impactos de las fases de transporte a obra, construcción del edificio, derribo y tratamiento final de los residuos o bien se estiman de forma global a partir de información estadística, otras evaluaciones realizadas, etc., o bien no se incluyen en el estudio por considerarse que su participación en el total del ciclo de vida tiene escasa relevancia.

A estos estudios simplificados se los conoce como ACV resumidos [Rieradevall et al. 2005] y, no obstante su condición de recorte respecto de la metodología desarrollada para los estudios de ACV completos, resultan de gran utilidad para la evaluación tendencial del impacto ambiental –no así para la determinación de impactos en forma cuantitativa y con gran exactitud- en la edificación. Entre otras características que facilitan su aplicación en la edificación, los ACV resumidos suponen un tiempo de realización de estudios más corto, unas

menores cantidades de información necesaria para representar las fases del ciclo de vida y sus escenarios y, finalmente, y unos menores costes económicos ya que es posible realizar buena parte de ellos con herramientas y fuentes de información de libre disposición, de bajo coste, o de uso público.

Anteriormente ha sido dicho que se intentará que los resultados de esta investigación puedan ser aplicables en la industria de la construcción, razón por la que todos sus planteamientos mantienen una estrecha relación con las tecnologías disponibles y asequibles en la actualidad. Por este motivo se ha optado por la realización de ACV resumidos, cuya metodología se explicará seguidamente, para el análisis ambiental de los distintos sistemas constructivos y de gestión que serán evaluados en relación con un mismo edificio base, recurriendo a la mayor cantidad de fuentes de información y herramientas de uso público posible. La intención es, más que llegar a resultados de gran exactitud o a un nivel de gran detalle, determinar tendencias para poder comparar distintas opciones constructivas y de gestión de recursos y establecer las bases de un método de análisis de ACV resumido y otros indicadores de eficiencia ecológica adecuados específicamente para el sector de la edificación.

Se pretende generar información que permita valorar, a través de indicadores comunes, el impacto ambiental del ciclo de vida de los edificios, determinando la interrelación entre sus fases (extracción-fabricación, transporte, construcción, mantenimiento, derribo o desconstrucción y disposición final) así como su repercusión en el total. Y hacerlo con herramientas y métodos que, si logran establecerse con consistencia a lo largo de este investigación, puedan ser aprovechadas posteriormente por los agentes del sector de la edificación que tienen incidencia en la definición constructiva y de gestión de los edificios (promotores, arquitectos y otros técnicos, gestores de edificios, etc.).

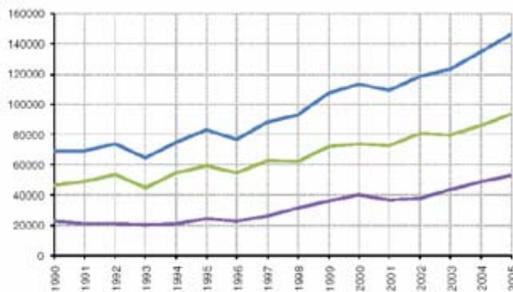
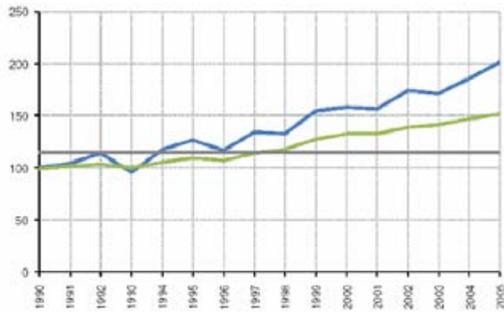
En los trabajos consultados ha sido detectado un cierto denominador común respecto de los principales parámetros que pueden tenerse en cuenta a la hora de evaluar en forma resumida el impacto ambiental del ciclo de vida de los edificios, mediante la estimación de los consumos de energía, agua y materiales, la generación de residuos sólidos, el agotamiento de recursos no renovables (materiales reciclados, reciclables y renovables) y los niveles de toxicidad al medio así como a los seres humanos como indicadores parciales, y a las emisiones de gas CO₂ como referente global.

El uso de energía es uno de los indicadores más difundidos y aceptados como unidad de medida del impacto ambiental de la edificación y de echo es allí donde incide actualmente la normativa ambiental que actúa sobre la fase de uso de los edificios⁹, ya que expresa la potencia y el trabajo empleados así como también un consumo de recursos no renovables y



Escalas de aproximación al cierre del ciclo de los materiales y, finalmente, al concepto de sociedad biológica contemporánea.

Clean Production Action, consulta en línea 08/2008
www.cleanproduction.org



Evolución de las emisiones de CO₂ del sector de la edificación respecto de la economía española (arriba) y Evolución de las emisiones de CO₂ globales del sector de la edificación respecto de la construcción y el uso de edificios.

A. Cuchi y A. Pagés, *Sobre una estrategia para dirigir al sector de la edificación hacia la eficiencia en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI)*, Ministerio de la Vivienda, octubre de 2007. Consulta on line, 02/2009, www.mviv.es

una liberación de emisiones contaminantes en función de cuáles fuentes energéticas se emplean. Tal consumo de energía, producida mayoritariamente a partir de quemar combustibles fósiles, es responsable una parte importante de las emisiones globales de CO₂, el gas que mayor repercusión tiene entre los gases de efecto invernadero GEI.

La necesidad de reducir las emisiones de CO₂ globales se ha hecho patente en el conjunto de la sociedad en los últimos años, a partir de los acuerdos globales alcanzados por los gobiernos¹⁰ y de la extraordinaria difusión lograda por el tema del cambio climático en prácticamente todos los medios de prensa del mundo. El consenso social sobre la limitación de la generación artificial de este gas y su asociación directa con otros impactos, como por ejemplo el consumo de energía no renovable y las emisiones de otros gases contaminantes relacionados como los óxidos de azufre SO_x, óxidos de nitrógeno NO_x, etc., han convertido a las emisiones de CO₂ en uno de los indicadores más representativos a la hora de evaluar la calidad ambiental de los edificios. Por otra parte, la edificación –la construcción y el uso de los edificios- es responsable de un 30% de las emisiones de CO₂ totales de España¹¹, de modo que cualquier disminución que pueda alcanzarse tiene un beneficio global importante.

La toxicidad al medio y la toxicidad a los seres humanos son dos grupos de impactos que resumen diferentes efectos ambientales y aportan una referencia general sobre cómo el uso de los recursos que la sociedad pone en juego afecta a la naturaleza. Los residuos sólidos, líquidos y gaseosos del proceso de fabricación de materiales, así como de la construcción y derribo de edificios, tienen repercusión en los dos grupos de toxicidad mencionados, a través de la combinación de distintos efectos¹²

El consumo de agua, se hace referencia aquí a la utilizada en los procesos de extracción de materias primas y fabricación de materiales, por entenderse que la se usa en los edificios depende más de la gestión de los usuarios que de su configuración física, y de materiales abióticos y bióticos, también conocido como MIPS (Material Intensity Per unit of Service) o en expresión coloquial mochila ecológica, implican una afectación de recursos naturales captados directamente de la corteza de la tierra. Como ha sido visto, luego de los procesos de fabricación y uso mayoritariamente son regresados al ambiente en forma de residuos contaminantes, por lo que toda utilización de agua y materiales que no contemple su reciclado mediante los sistemas biosférico o técnico-industrial está relacionada directamente con el deterioro del capital natural con que cuenta el planeta. De allí que resulte útil conocer las cantidades de agua y materiales abióticos o bióticos que son afectados directa o indirectamente por la edificación, o bien establecer qué diferencias puede haber entre uno u otro de los tipos de edificios analizados.

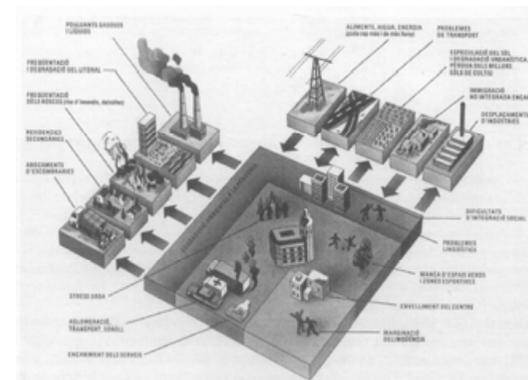
Diferentes proyectos, sistemas constructivos y formas de gestión de obra producen cantidades de residuos de construcción y derribo variables, alejando a la arquitectura del cierre de los ciclos materiales. De allí que interese medir la cantidad, naturaleza y procedencia de los residuos, puesto que es una manera de medir cuán abiertos están los ciclos materiales de la edificación.

Por otra parte, la utilización de material reciclado que además sea material reciclable al final de la vida útil del edificio va en sentido contrario, es decir facilita el acercamiento de la arquitectura a un sistema de ciclo cerrado. A partir de ello resulta de interés determinar la cantidad y naturaleza del material reciclado y reciclable.

Algunos de estos indicadores están relacionados con todas etapas del ciclo de vida del edificio mientras que otros se limitan a algunas de ellas, ya sea porque el impacto que miden se centra en un espacio temporal limitado, porque su repercusión fuera de él no es significativa, o porque existen importantes limitaciones en la disposición de información para poder determinarlos.

En consecuencia, para cada uno de los cuatro tipos de edificios señalados (convencional y modulares en acero, madera y hormigón) serán calculados los indicadores ambientales que se describen a continuación:

- 1- Peso de los materiales por unidad de superficie [Kg/m^2]: peso final de la materia de los diferentes elementos que conforman una solución constructiva, considerando el mantenimiento, incluyendo los residuos de la obra durante la construcción. No incluye los recursos abióticos, bióticos, agua y erosión (MIPS) de la extracción de materias primas.
- 2- Consumo de energía por unidad de superficie [MJ/m^2]: gasto energético asociado a todos los procesos que tienen lugar durante la vida útil del edificio, entre ellos la extracción y fabricación de materiales, el transporte a obra, la construcción o el montaje, el uso, el mantenimiento, la demolición o la desconstrucción, le vertido o la puesta en reciclaje de los residuos, etc.).
- 3- Emisiones de CO_2 por unidad de superficie [kgCO_2/m^2]: liberación de dióxido de carbono asociada a todos los procesos que tienen lugar durante la vida útil del edificio, reseñados en el indicador de consumo de energía por unidad de superficie.
- 4- Toxicidad ambiental por unidad de superficie [$\text{HCA}+\text{HCWkg}/\text{m}^2$]: cantidad de emisiones o vertidos contaminantes al aire y al agua que afectan la salud de los ecosistemas asociados a todos los procesos que tienen lugar durante la vida útil del edificio, reseñados en el indicador de consumo de energía por unidad de superficie.



Esquema de los flujos de recursos y residuos que intervienen en el funcionamiento de los edificios.

suponga cambio en las tendencias de impacto detectadas y validadas en base a referencias externas a la investigación. Dicho de otro modo, el margen de incoherencia será estudiado y limitado mediante la comparación de valores procedentes de distintas fuentes¹⁵, hasta asegurar que su influencia en los resultados no pueda producir distorsiones que pongan en riesgo la validez de las conclusiones.

Las bases de datos, métodos de evaluación y otras referencias a emplear en la determinación de los impactos expresados en los diez indicadores antes descritos son:

- En 1 (peso de los materiales) el programa TCQ 2000 [ITeC TCQ 2006] y el banco PR/PCT [ITeC BEDEC 2006] del Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya, así como cálculos propios para la determinación del volumen de los materiales que conforman las diferentes soluciones constructivas y de su peso específico.

- En 2 y 3 (energía y emisiones de CO₂), en la etapa de construcción, el programa TCQ 2000 y el banco PR/PCT reseñados en el punto anterior, así como de otras fuentes de información reconocidas, entre ellas las bases de datos Inventory of Carbon & Energy (ICE) de la Universidad de Bath [Hammond, Jones 2007], Building Construction Manual [Hegger et al. 2006] y Green Building Handbook [Wooley, Kimmins 2000]. En cuanto al control de la demanda energética de climatización, los programas de simulación LIDER [Min. Vivienda, IDAE 2007] (asociado al cumplimiento del documento HE1 del Código Técnico de la Edificación) y Ecotect [Marsh 2007], que permite estudiar la iluminación natural, convirtiendo los valores de energía final a emisiones de CO₂ del Plan de Energías Renovables de España 2005-2010 y del Plan de Acción de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España elaborado por el Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía IDAE.

- En 4 y 5 (toxicidad ambiental y humana) información elaborada por el grupo de trabajo del Centre d'Iniciatives de Edificació Sostenible [CIES 2001] generada mediante el programa de análisis de ciclo de vida SimaPro versión 6.0 y la base de datos Ecoinvent System Process generada por el centro suizo Life Cycle Inventories, trabajando sobre las cantidades de materiales que conforman las distintas soluciones constructivas. El método de evaluación de impacto es CML 1992.

- En 6 y 7 (afectación de recursos abióticos, bióticos y agua) los valores de intensidad material por unidad de servicio, MIPS, elaborados por el Wuppertal Institute de Alemania [Wuppertal 2003] para recursos abióticos, recursos bióticos y agua respectivamente, aplicados sobre las cantidades de materiales que conforman las distintas soluciones constructivas.

Source	Description	MJ/kg
Alcorn	Timber, kiln dried, dressed	2.5
	Timber, glulam	4.6
	Timber, medium density fibreboard	11.9
Buchanan	Timber, kiln dried, treated	9.4
	Timber, glulam	9
	Timber rough	1.7
	Timber, air-dried, treated	2.4
	Timber Formwork	0.6
	Hardboard	41.2
FEMP	Softboard	31.0
	Lumber (GFF range)	4-7
	Particleboard (DOE range)	14-20
Lawson	Plywood	18
	Timber, softwood stud	3.5
	Timber, particleboard (softwood)	8.0
	Timber hardboard (hardwood)	24.0
	Timber, imported Red Cedar frame	4.5
	Timber hardwood engineered product	11.0
	Timber floors	1.9
Timber frame, timber weatherboards	1.5	
Timber studs with plasterboard	1.3	
Range		0.57-41.2

Diferencias en el consumo de energía de fabricación de madera entre distintos tipos y fuentes de información. La dispersión de valores (range) es de más del 7000%.

Joanna Glover, Wich is better? Concrete or Wood: A comparison... (tesis doctoral), Department of Chemical Engineering University of Sydney, Australia, 2001



- En 8 (residuos de construcción y derribo) el programa TCQ 2000 y el banco PR/PCT del ITeC ya mencionados en la determinación del peso de los materiales, así como el programa de ayuda para la elaboración del plan de residuos [ITeC prog 2000] de la misma institución, así como cálculos propios a partir de la determinación del volumen de los diferentes residuos y del peso específico de cada uno de ellos para la construcción *in situ*. En el caso de la construcción modular en fábrica la fuente de información sobre generación de residuos son diversos estudios sobre prefabricación madera, hormigón y acero elaborados por el Waste & Resources Action Programme del Reino Unido [WRAP 2007-1], [WRAP 2007-2], [WRAP 2007-3] y [WRAP 2007-4].

- En 9 y 10 (material reciclado y reciclable) cálculos propios a partir de la determinación del volumen de los diferentes materiales que conforman una solución constructiva y del peso específico de cada uno de ellos, e información diversos fabricantes e instituciones y especialmente del l'Agència de Residus de Catalunya y el Programa de Gestión de Residus de la Construcció de Catalunya [ARC 2006].

En cuanto al alcance del análisis del ciclo de vida, aún teniendo en cuenta que se trata de un estudio resumido y que la mayor parte del impacto ambiental de los edificios tiene lugar en las fases de fabricación de materiales y uso¹⁶ se pretende analizar todas las etapas relevantes. Debido a que en este estudio se pretenden determinar pautas para el cierre del ciclo de los materiales y que se está trabajando sobre sistemas constructivos prefabricados se ha creído conveniente abarcar también la incidencia del transporte afectado entre la fabricación de materiales y la puesta en obra, así como las etapas de construcción, mantenimiento y derribo. En consecuencia, las fases que serán estudiadas son las que se detallan seguidamente.

1- Extracción de materias primas y fabricación de materiales. Comprende las operaciones que llevan adelante las industrias extractivas y procesadoras materias primas así como fabricantes de productos para la construcción, incluidas las de reciclaje en los casos en que correspondan.

2- Transporte de materiales y componentes a obra. Debido a la gran dispersión geográfica y funcional de la industria de la construcción y sus subsidiarias, este estudio se centra en el tramo de movimientos que va desde los proveedores de productos para la construcción hasta el emplazamiento del edificio.

3- Construcción o prefabricación y montaje. Abarca las operaciones que se realizan en obra o en la fábrica de módulos y que están directamente relacionadas con el proceso constructivo del edificio. Construcción en el caso del sistema constructivo convencional y prefabricación más montaje en el caso de los sistemas modulares.

4- Uso y mantenimiento. Se refiere en primer lugar al funcionamiento de las instalaciones que suponen un consumo de energía, necesarias para alcanzar la habitabilidad, y en segundo lugar a las operaciones de mantenimiento y reposición de materiales y componentes de instalaciones regulares del edificio.

5- Derribo o desmontaje y gestión de residuos. Incluye las operaciones necesarias para dejar el suelo libre una vez que el edificio ha acabado su vida útil y a partir de allí para que los residuos puedan alcanzar su tratamiento final en el caso del sistema constructivo convencional (carga, transporte y gestión de residuos) o para que los materiales puedan ser reciclados en el caso de los sistemas modulares. El derribo tiene lugar en el sistema constructivo convencional y el desmontaje en los sistemas modulares.

En estas fases se tendrán en cuenta las observaciones que se describen a continuación y que afectan la forma en que los distintos impactos ambientales serán determinados.

- En 1 (extracción y fabricación) se encuentra concentrada una buena parte de la energía que la edificación consumirá a lo largo de su vida útil, así como otros impactos ambientales directamente relacionados, pudiendo suponer hasta un tercio del total en edificios convencionales contemporáneos [SaAS et al. 2007]. Aun más, teniendo en cuenta que las nuevas exigencias normativas españolas sobre edificación de obra nueva¹⁷ relacionadas con la transposición local de las directivas europeas, como la 2002/91/CE sobre eficiencia energética de edificios que marca la tendencia en toda la región, concentran su presión ambiental sobre la reducción del gasto energético de uso de los edificios, es de suponer que la incidencia relativa de la fase de extracción y fabricación irá en aumento y por tanto el conocimiento sobre las alternativas para su disminución cobrará cada vez más importancia.

En su consideración se utilizará el banco de partidas de edificación y rehabilitación PR/PCT del ITeC, donde un 90% de ellas cuenta con información sobre energía y emisiones de CO₂. Para poder emplearlo hace falta disponer del programa TCQ 2000 en las versiones 3.1 y superiores, que son las que cuentan con el módulo de gestión ambiental TCQGMA. Estos dos recursos -banco y programa- hacen posible la obtención de datos ambientales ordenados en los niveles de materiales, partidas y capítulos de presupuesto de un edificio, con las repercusiones absoluta (valor total) y relativa (valor por m²) de emisiones de CO₂ y energía de fabricación de materiales, así como residuos de construcción y embalaje.

Este banco y programa han sido escogidos para este estudio debido a que conforman el único sistema disponible (a nivel estatal y europeo) capaz de aportar, leer y procesar información ambiental de los materiales en los diversos niveles de un presupuesto de construcción¹⁸. Sobre la información básica del banco PR/PCT se realizarán modificaciones

BEDEC (Act: 01.01.2009)

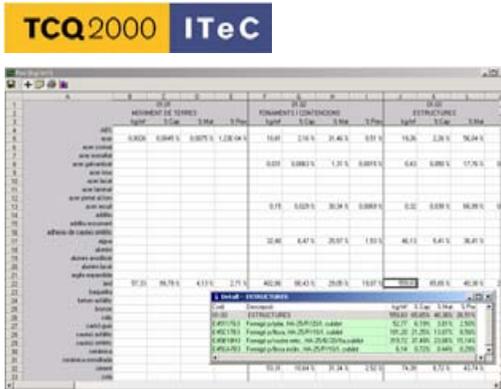
- + 1 - Elementos complejos de edificación
- E - Elementos unitarios de edificación
 - + E2 - Derribos, movimientos de tierras y gestión de residuos
 - + E3 - Cimientos
 - + E4 - Estructuras
 - + E5 - Cubiertas
 - E6 - Cerramientos y divisorias
 - E61 - Paredes y tabiques de obra de fábrica
 - E612_01 - Pared de cerámica (P)
 - E612_01 - Pared de cerámica con mortero elaborado en obra (E)

E612_01 - PARED DE CERÁMICA CON MORTERO ELABORADO EN OBRA (E)

RS E6122R3N m2 Pared divisoria apoyada de espesor 14 cm, de ladrillo macizo de elaboración manual, HD, categoría I, según norma UNE-EN 771-1, de 390x140x30 mm, de resistencia a compresión 13 N/mm², a una cara vista, tomado con mortero E4, con cemento CEM I y aditivo inclusor aire/plastificante 39,42 € (1,74)

Consumo	Peso		Ciclo energético		Emisión CO ₂	
	kg	MJ	kWh	kg	kg	kg
Componentes constitutivos de materiales						
aditivo	0,021	1,95	0,54	0,29		
agua	5,52	0,033	0,0092	0,0016		
árido	41,92	6,23	1,75	0,34		
cimento	10,48	39,59	11,00	0,73		
cerámica	228,37	623,63	173,28	47,33		
Componentes constitutivos de maquinaria						
eléctrica	-	0,29	0,080	0,042		
Total	289,31	671,80	186,66	56,72		

Los datos sobre peso, energía, emisiones de CO₂ y residuos de obra de partidas de edificación de base de datos PR/PCT del ITeC que pueden consultarse libremente en www.itec.cat > metabase serán utilizados para calcular los valores de esos indicadores en la etapa de construcción.



El programa TCQ 2000 del ITeC, a través de su módulo de gestión ambiental TCQGMA, será utilizado para calcular los valores de energía y emisiones de CO₂ del proceso de construcción.

cuando el elemento o solución constructiva a analizar no exista en él o bien cuando los datos ambientales (valores de peso de los distintos materiales y de residuos de las distintas partidas) que allí aparecen no coincidan con los aportados por otras instituciones reconocidas, por los propios fabricantes o por las verificaciones que expresamente se realicen al respecto.

También serán revisados y si cabe modificados los coeficientes de paso que el programa TCQ 2000 utiliza por defecto para convertir el peso de los materiales en energía y emisiones (MJ/kg y KgCO₂/kg), utilizándose para ello distintas referencias como los valores procedentes de organizaciones de fabricantes, o bien y a falta de referencias españolas¹⁹ de bases de datos de origen europeo como Inventory of Carbon & Energy (ICE) de la Universidad de Bath [Hammond, Jones 2007], Building Construction Manual [Hegger et al. 2006] y Green Building Handbook [Wooley, Kimmins 2000], etc. En esta fase serán tenidos en cuenta los indicadores: 01 peso de los materiales, 02 consumo de energía, 03 emisiones de CO₂, 04 toxicidad ambiental, 05 toxicidad humana, 06 recursos abióticos y bióticos, 07 recursos agua, 09 material reciclado y 10 material reciclable.

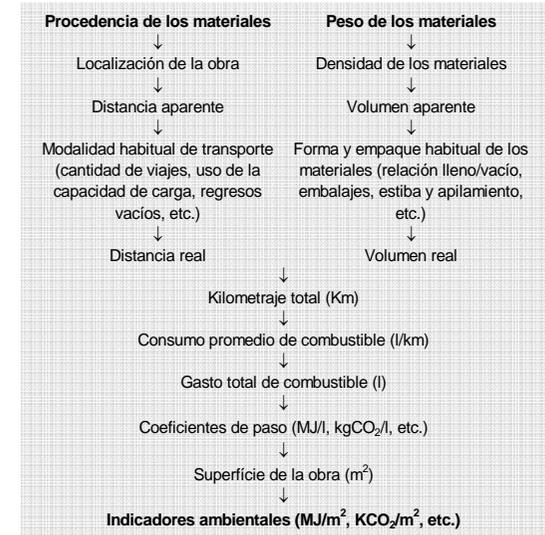
- En 2 (transporte) y tal como ha sido dicho antes, debido a la dificultad en cuanto a método y datos a aplicar para representar la complejidad de de los movimientos ocasionados por la dispersión geográfica del sector de la construcción a lo largo del ciclo de vida de un edificio determinado, esta fase tendrá un alcance limitado que permitirá, sin embargo, establecer conclusiones útiles para comparar los distintos tipos de edificios según este impacto. En consecuencia se tendrán en cuenta sólo los desplazamientos correspondientes a los materiales y componentes de construcción -o fabricación y montaje en el caso de los sistemas modulares- desde la fábrica que los produce hasta el sitio del emplazamiento del edificio. La repercusión del transporte, a causa de la compleja asignación de las cargas ambientales que debería establecerse sobre las infraestructuras y el material rodante teniendo en cuenta que su uso es compartido por múltiples actividades, se centrará en los combustibles utilizados directamente por los medios de transporte. Para ello serán tenidos en cuenta el peso y el volumen a transportar por carretera mediante el uso de camiones estándar, su utilización plena o a media carga, la cantidad de viajes, los retornos con o sin carga, así como también los consumos promedio de combustibles que sean establecidos por estudios de instituciones oficiales o reconocidas en el sector²⁰. Una vez conocidos los consumos de combustible atribuibles a todos los desplazamientos entre la fábrica de materiales, la planta de producción de módulos y la obra -generalmente expresados en litros de gasoil- serán calculados los indicadores 02 consumo de energía, 03 emisiones de CO₂, 04

toxicidad ambiental y 05 toxicidad humana, mediante el uso de los correspondientes coeficientes de paso, basados en las fuentes ya comentadas.

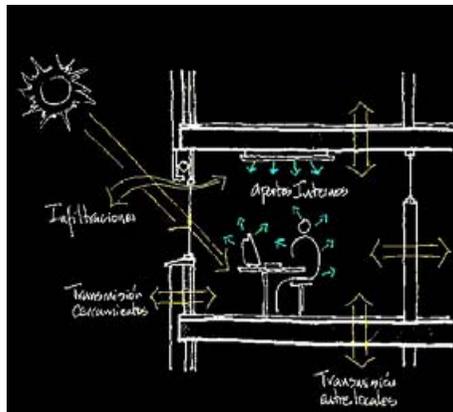
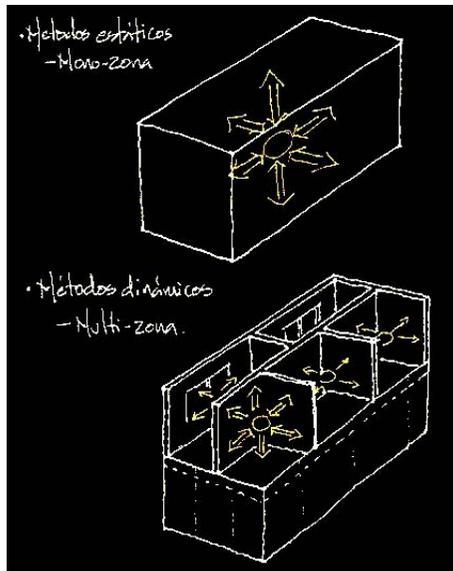
- En 3 (construcción o prefabricación) tal como ya había sido anticipado no se producen impactos ambientales de gran magnitud, a excepción de la generación de residuos sólidos. No obstante, teniendo en cuenta que se realizará una comparación entre sistemas constructivos convencionales y prefabricados con repercusiones de obra muy diferentes, así como que se pretende de alcanzar una aproximación a un análisis que abarque el ciclo de vida en forma resumida, esta fase se incluye en el presente estudio.

La utilización de maquinarias y equipos en la ejecución de las tareas de transformación ligera de materiales o de posicionamiento y fijación de los componentes prefabricados de construcción no suele suponer más de un 2% del consumo de energía a lo largo de la vida útil de un edificio, con afectaciones también menores en otros impactos ambientales [SaAS et al. 2007]. En cuanto a la repercusión de la mano de obra, o de los impactos ambientales asociados al personal de obra en la dedicación a las actividades de la construcción, no se tendrá en cuenta debido a la dificultad metodológica que existe en discriminar cuáles cargas podrían ser asignadas a las actividades de la construcción y cuáles otras son inherentes al resto de ocupaciones de las personas. Si se considera la energía que proviene de la alimentación, por ejemplo, resultará prácticamente imposible diferenciar qué parte podría afectarse a una obra y que parte al resto de la vida del trabajador. Otro tanto ocurre con el transporte, donde la localización de la obra o de la fábrica modular por una parte y de la residencia de los trabajadores por la otra varía significativamente de caso en caso, pudiendo llegarse de esta manera a resultados que no son suficientemente representativos. Existe por tanto un riesgo elevado de incurrir en doble contabilidad y, aún en el caso en que se pudiera salvar este problema, la mano de obra tendría una escasa repercusión ambiental frente a la maquinaria empleada en tareas intensivas en energía.

Para la determinación de los impactos representados en los indicadores 02 consumo de energía, 03 emisiones de CO₂, 04 toxicidad ambiental y 05 toxicidad humana serán tenidas en cuenta todas las tareas comprendidas entre la puesta en obra o en fábrica (en el caso de los sistemas modulares) de los materiales y componentes constructivos y el edificio completamente construido. Mediante la utilización del banco PR/PCT y del programa TCQ 2000 del ITeC con todas las observaciones ya comentadas en la fase de extracción y fabricación de materiales, de datos de los fabricantes y de cálculos propios será establecida la cantidad de energía que se utiliza en los procesos de construcción así como de prefabricación y montaje correspondientes a los distintos sistemas constructivos, que permitirá obtener las repercusiones en emisiones de CO₂, toxicidad ambiental y toxicidad



Esquema de la secuencia de cálculo del impacto ambiental del transporte de materiales entre el proveedor (fábrica o distribuidor) y la obra, a partir de la procedencia y el peso de los materiales.



El comportamiento energético de los edificios se estudiará mediante programas informáticos de simulación multizona dinámicos.
Esquemas: Fabian López.

humana directamente relacionadas. En el caso del indicador 08 residuos de construcción y derribo (naturalmente en esta fase se calcularán los primeros) también se acudiría a la ayuda del banco PR/PCT y del programa TCQ 2000 especialmente en el caso del sistema constructivo convencional, debiéndose establecer en los casos modulares los residuos a través de la información que puedan proporcionar los fabricantes, de cálculos propios y de estudios de referencia en el sector tales como los desarrollados por el Waste & Resources Action Programme del Reino Unido [WRAP 2007-1], [WRAP 2007-2], [WRAP 2007-3] y [WRAP 2007-4]. En el caso de los sistemas prefabricados no se tendrá en cuenta el transporte de los módulos entre la fábrica y la obra, ya considerado en la fase de transporte, aunque sí naturalmente su izado y posicionamiento en el edificio.

- En 4 (uso y mantenimiento) habitualmente se produce un 60-70% del consumo de energía de la vida de los edificios así como de otros impactos asociados [SaAS et al. 2007] y, de hecho, es en esta etapa donde la normativa vigente en España, esencialmente el Código Técnico de la Edificación CTE y el Real Decreto de Certificación Energética de los Edificios que responden a la transposición de la Directiva Europea 2002/91/CE sobre eficiencia energética de los edificios, tiene mayor incidencia ambiental. Estas normativas y su herramienta de evaluación oficial, el programa informático LIDER para la verificación de la limitación de la demanda energética, será utilizado como marco de referencia de esta etapa, en lo referido al uso de los edificios. Complementariamente y a efectos de poder contrastar la información con una segunda referencia, se realizará otra simulación mediante el programa Ecotect.

El planteamiento consiste en igualar las cuatro versiones de edificio a analizar en un umbral común determinado el cumplimiento de la normativa en sus niveles mínimos, es decir que las respuestas constructivas convencional y modulares de hormigón, acero y madera sean evaluadas como unidades funcionales equivalentes desde el punto de vista de todo aquello que pueda afectar a la energía de climatización. O, lo que es lo mismo, que tengan idénticas prestaciones no sólo desde el punto de vista de su superficie, forma, estructura, etc., sino también de comportamiento térmico (aislamiento, protección solar, etc.). Se evita de esta manera –haciendo que los distintos sistemas se aproximen a un mismo nivel de demanda en la energía de uso- la distorsión que podría provocar la etapa de uso en el ciclo de vida de los edificios si los comportamientos de cada uno de ellos, a causa de diferentes niveles de aislamiento térmico por ejemplo, fueran significativamente distintos. A partir de este concepto y si bien la modificación de la configuración inicial de los módulos se abordará más adelante, en oportunidad del estudio de las propuestas de mejora u optimización ambiental para llegar

a determinar un sistema óptimo, los niveles de aislamiento térmico y la solución de puentes térmicos deberá quedar resuelta en esta etapa.

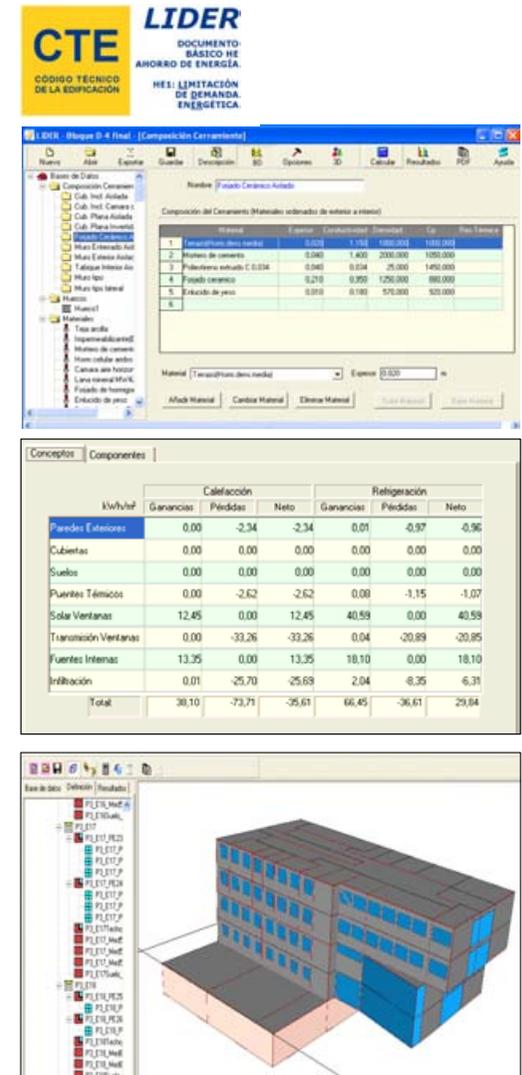
El primer paso para conocer cuál será el consumo final de energía en los edificios y sus emisiones asociadas es el análisis de las necesidades energéticas a cubrir de acuerdo con las características del edificio, su envolvente térmica, las condiciones de operación y funcionamiento y los niveles de habitabilidad que en este caso vienen determinados por la normativa CTE. Es lo que se denomina habitualmente como evaluación de la demanda energética y supone el análisis del edificio sin tener aún ningún tipo de instalación o sistema térmico definido.

Se realizará una simulación energética en régimen transitorio de transferencia de calor, considerando todas las zonas que tiene un edificio (análisis multizona) para los cuatro casos a estudiar mediante el programa LIDER, a partir de una representación poligonal para cada uno de ellos que reconstruye su configuración física (volumen, forma, disposición de espacios, materiales, huecos en la envolvente, etc.).

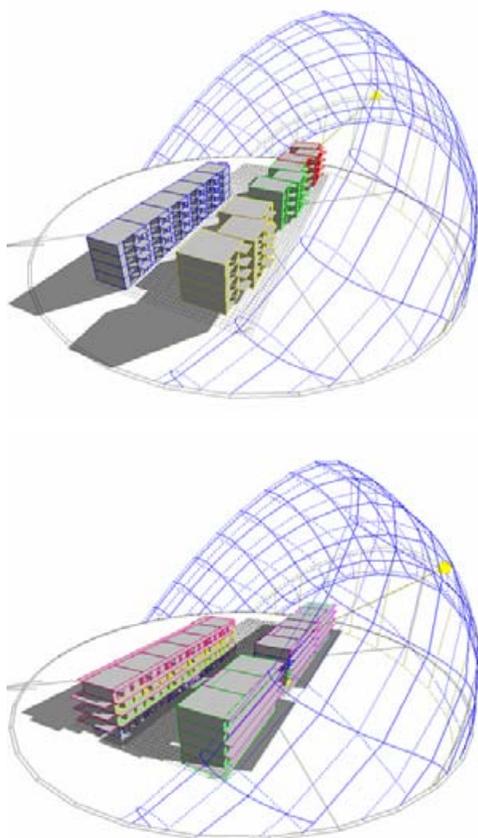
Por ser una herramienta asociada al cumplimiento de la normativa, LIDER centra el análisis en las características de la envolvente del edificio. Los parámetros de confort para las diferentes épocas del año son prefijados por el programa, así como las características del uso del edificio (aportes internos por ocupación y aparatos). El programa analiza la demanda de energía de calefacción y refrigeración por separado y, adicionalmente, verifica que no haya ningún elemento de la envolvente con valores límite superiores a los exigidos por la norma, que no se superen los valores límite de permeabilidad en ventanas, ni que se generen condensaciones superficiales o intersticiales en los cerramientos.

La simulación permite conocer la situación de un determinado proyecto frente a las exigencias normativas sobre limitación de la demanda energética definidas en el CTE, mediante la comparación del edificio proyectado respecto a otro que el propio programa crea -denominado de referencia- que cuenta con las mismas características de forma y emplazamiento pero con soluciones constructivas que cumplirían estrictamente con los valores límite establecidos en la opción simplificada del documento básico HE1 del citado código. Algo así como un edificio espejo, cuyo objetivo es representar el mínimo exigible por normativa para un caso determinado y en una zona climática específica.

Mediante sucesivas comparaciones con sus respectivos edificios espejo o de referencia, será posible ajustar las cuatro soluciones constructivas hasta el mismo nivel de prestaciones térmicas básicas. O, lo que es lo mismo, igualarlos en el valor límite establecido por el CTE para cada caso y, como ya se ha comentado, hacer que los cuatro proyectos sean equivalentes desde el punto de vista térmico.



El programa de simulación energética a utilizar es LIDER debido a que es la herramienta de referencia en la limitación de demanda de energía del Código Técnico de la Edificación y es de libre acceso. No obstante y a efectos de contrastar la información, se realizará una segunda simulación mediante el programa Ecotect.



Imágenes correspondientes a una simulación energética de edificio de viviendas realizadas mediante el programa Ecotect, que se utilizará en esta investigación como referencia de tendencias y valores absolutos de demanda de climatización.

En forma complementaria y respecto del aprovechamiento de las condiciones locales del emplazamiento de los edificios se utilizará el programa informático Ecotect, que permite estudiar las condiciones de soleamiento y su repercusión en el interior del edificio en términos de sombras e iluminación natural. También permite realizar el análisis de la demanda energética del edificio, aunque sin las restricciones que para el cumplimiento normativo tiene la herramienta oficial LIDER, algo que es especialmente útil para evaluar en términos de demanda energética absoluta la incidencia de algunas opciones de mejora de los sistemas modulares que se estudiarán en el capítulo 8.

Respecto de la localización de los edificios a estudiar, se han escogido dos zonas climáticas de España de características diferentes, a efectos de poder estudiar el comportamiento de los sistemas constructivos en situaciones en que la demanda de calefacción sea predominante, representada por la zona C2 (Banyoles), y en que la demanda de refrigeración sea predominante, representada por la zona B4 (Sevilla). En el ciclo de vida de los edificios serán tenidos en cuenta los valores de demanda total de energía de la primera de ellas, ya que se considera que es más representativa del territorio de España.

Una vez determinada la demanda energética del edificio desprovisto de instalaciones, que como se ha dicho es lo que interesa específicamente en esta investigación, a efectos de completar la información sobre la energía que las cuatro versiones de edificios utilizarían para alcanzar las condiciones de habitabilidad se calculará el consumo energético de calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria ACS, en la que interviene la instalación de captación solar definida por la normativa. Por ser éstos los usos más directamente relacionados con la definición del edificio, serán los que formarán parte de la contabilidad del consumo energético a lo largo del ciclo de vida. Pero existen otros consumos de energía en el uso de la vivienda, como la iluminación, la cocina y los electrodomésticos, que si bien tienen una repercusión importante en el total del gasto, un 31% según las estadísticas del IDAE²¹ serán estimados pero no incluidos en el ciclo de vida debido a que no responden directamente a la configuración física del edificio, o a su sistema constructivo, sino a las pautas de utilización de sus ocupantes (uso de alta o baja intensidad) y al tipo de equipamiento instalado (equipos de alta o baja eficiencia, instalaciones de energía renovable, etc.). No obstante ello y a modo de referencia, estos gastos energéticos serán estimados a partir de valores estadísticos, ajustándolos al tipo de edificio que se estudia, a efectos de no perder de vista ni la totalidad del problema del consumo de la energía en el uso de la vivienda ni el grado de participación que pueden tener en él los aspectos que se están analizando en este estudio.

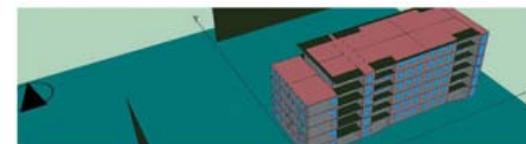
El cálculo del consumo de energía se realizará a partir de valores estadísticos estándar, teniéndose en cuenta como fuentes de energía el gas natural para la calefacción y el ACS y

la electricidad en el resto de usos. Los rendimientos de las calderas de calefacción y ACS y de las bombas de calor para refrigeración se obtendrán de las situaciones estándar previstas en la Memoria de Cálculo correspondiente a la Opción Simplificada para la Calificación de Eficiencia Energética de Edificios de Viviendas. Los coeficientes de paso utilizados para transformar la energía final utilizada a emisiones de CO₂, que representan las emisiones generadas en la combustión del gas y en la producción de electricidad según el *mix* energético español, se tomarán del Plan de Energías Renovables de España 2005-2010 y del Plan de Acción de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España.

Respecto de los usos iluminación, cocina y horno, y electrodomésticos, se estimarán de forma proporcional a la superficie de las viviendas y al número de ocupantes tomando como base de referencia el estudio *Paràmetres de Sostenibilitat*, basado en datos del Institut Català de l'Energia, desarrollado por el ITeC [Mañá et al. 2003], ajustando el escenario de usos allí considerado respecto de los cambios ocurridos con las prácticas de uso habituales y las normativas vigentes.

Finalmente, en la consideración de la etapa de uso no puede dejar de mencionarse tampoco el tema del agua potable, con un consumo que en España actualmente se sitúa en 160 litros por persona y día²² y que supone su conversión total en aguas residuales. Al igual que lo que ocurre con los consumos domésticos de la energía, el gasto de agua en la vivienda no está directamente relacionado con la configuración física del edificio, sino con el comportamiento de sus ocupantes y el tipo de instalaciones que en él se dispongan. Naturalmente que las características de un edificio en sí mismas pueden tener incidencia directa en el problema del agua ya que, por ejemplo, aspectos tales como la conformación de la cubierta o la cantidad y tipo de artefactos sanitarios pueden colaborar en el aprovechamiento de aguas de lluvia así como influir en el aumento del consumo de agua potable, respectivamente. De todas maneras, y centrándose en el interés específico de este estudio, el consumo de agua de uso será considerado a partir de valores estadísticos. La determinación de este gasto, que se suma al ya comentado en la etapa de extracción de materias primas y fabricación de materiales, permitirá establecer el consumo total de agua en el ciclo de vida del edificio así como la incidencia relativa que las distintas fases pueden tener en él.

En cuanto al mantenimiento de la construcción e instalaciones de los edificios se hará una aproximación a la repercusión del consumo de materiales que suponen las tareas de conservación y reposición de elementos constructivos. Se tendrá en cuenta que los distintos materiales tienen una durabilidad específica a establecer, que habitualmente es menor que la vida útil del edificio que conforman. Durante este tiempo, fijado como en otros estudios



Opciones estudiadas	Demanda en kWh/m ²			Ahorros conseguidos		
	Calef.	Refrig.	Total	Calef.	Refrig.	Total
Edificio sin mejoras	70,21	5,54	75,75			
1: Vidrios simples, marcos aislantes	69,14	5,6	74,74	1,53%	-1,13%	1,34%
2: Marcos no aislantes, vidrios dobles	64,35	5,73	70,08	8,35%	-3,39%	7,49%
3: Vidrios dobles y marcos aislantes	62,02	5,86	67,88	11,67%	-5,75%	10,39%
4: Vidrios y marcos óptimos*	56,42	6,08	62,5	19,65%	-9,77%	17,50%
5: Protección solar en fachada sur	70,21	5,26	75,47	0,00%	5,09%	0,38%
6: Protección solar en todas las fachadas	70,21	5,37	75,58	0,00%	3,12%	0,23%
7: Aislamiento térmico de 5 cm en fachada	59,43	5,4	64,82	15,36%	-2,57%	14,43%
8: Aislamiento térmico de 6 cm en cubierta	67,43	5,41	72,84	3,96%	-2,33%	3,84%

Estudio de variación de la demanda energética de un edificio de viviendas según se modifican los elementos de su envolvente, mostrando que para esa tipología (bloque a doble crujía), orientación (lados largos a norte-sur) y localización (Madrid) la variación puede ser de hasta un 17%.

A. Cuchi, F. López, A. Sagrera y G. Wadel, *Guía de la eficiencia energética para administradores de fincas*, Fundación gasNatural, 2007, Barcelona.



Imagen superior www.merlo.com, imagen inferior i443.photobucket.com

similares en 50 años será necesario incorporar al edificio unos materiales adicionales para conservar sus propiedades físicas, prestaciones técnicas o características funcionales, que habitualmente se agrupan en el concepto de mantenimiento, aunque cabe distinguir entre éste último y la reposición. La referencia técnica a tener en cuenta para la determinación de las tareas y las frecuencias de mantenimiento, reposición parcial y sustitución total de materiales y componentes de instalaciones son las fichas técnicas editadas por el Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya [ITeC 1991].

Sobre el mantenimiento debe decirse que según el tipo de material a considerar, pueden suponerse 3, 4, 6 o más tratamientos dentro del período de vida útil del edificio, pudiendo superarse de esta manera el impacto inicial del producto o componente que se está protegiendo o rehabilitando (sobre todo en los casos de elementos de bajo impacto ambiental, como por ejemplo una ventana de madera sin acabado superficial). Sobre la reposición, cabe decir que los mismos impactos ambientales de un determinado material pueden tener más o menos repercusión según sea su vida útil. Así, un material con una durabilidad de 10 años se contará 5 veces en el inventario de impactos, otro de 25 años 2 veces y un tercero de 50 años, sólo 1 vez.

Cuanto mayor sea la durabilidad de los materiales expuestos al desgaste del uso o a la acción de las condiciones climáticas y más reducida sea la cantidad de materiales implicados en el mantenimiento, menor será su repercusión en el impacto ambiental total del edificio, concepto que será tenido en cuenta especialmente en el momento de definir acciones de mejora en el prototipo modular optimizado.

En síntesis, en esta fase de uso y mantenimiento serán tenidos en cuenta los indicadores: 01 peso de los materiales, 02 consumo de energía, 03 emisiones de CO₂, 04 toxicidad ambiental, 05 toxicidad humana, 06 recursos abióticos y bióticos, 07 recursos agua, 09 material reciclado y 10 material reciclable.

- En 5 (derribo y residuos) serán tenidas en cuenta las operaciones necesarias para devolver al solar sus condiciones originales o bien su capacidad de ser utilizado nuevamente sin limitaciones de ningún tipo, lo que supone el derribo, en el caso de la construcción convencional, o el desmontaje, en el caso de la construcción modular, de la totalidad del edificio, incluidas las cimentaciones y otros elementos que puedan estar bajo rasante, como las instalaciones de evacuación. Se contarán además las acciones necesarias para disponer los residuos, en el caso de la construcción convencional, y los materiales, en el caso de la construcción modular, en las etapas finales de gestión de residuos y de reutilización, rehabilitación o reciclaje respectivamente, es decir las operaciones de derribo, separación y clasificación en obra, más carga y transporte hasta destino (vertederos autorizados o plantas

de reciclaje) de que resulten oportunas. Para todo ello se utilizará el banco PR/PCT y programa TCQ 2000, la información estadística del Proyecto Life 98/351²³, así como también estimaciones propias.

Debido a que los ahorros en las cargas ambientales de los materiales reciclados -con respecto a los que no lo son- se tienen en cuenta en la primera etapa (extracción y fabricación) de este análisis de ciclo de vida resumido, no se tendrán en cuenta aquí.

Las operaciones de derribo o desmontaje del edificio y de gestión de los residuos o los materiales suponen, básicamente, la utilización de maquinaria y mano de obra. A partir de ello, y con la excepción del flujo de materia que será valorado desde el punto de vista ambiental como residuos o nuevas materias primas según sea efectivamente reciclado o no de acuerdo con las prácticas habituales en el mercado, el principal efecto a considerar es el consumo de energía y sus impactos ambientales directamente asociados. De manera similar a lo que ocurre en la fase de transporte a obra, la repercusión de la amortización de los equipos y maquinarias, así como de las infraestructuras viales, resulta de muy compleja consideración. Teniendo en cuenta que su uso es compartido con múltiples actividades y que la duración de su vida útil es variable, su incidencia específica resulta de muy difícil determinación y por tanto no será tenida en cuenta. Se realizará, por tanto, una estimación de la energía directamente empleada en todas las operaciones descritas (electricidad en máquinas-herramienta y grúas y gasoil en volquetas, cargadoras y camiones), que mediante el uso de coeficientes de paso ya comentados en ocasión del análisis de la etapa de uso del edificio podrá convertirse en valores de contaminación asociada (CO₂, toxicidad humana y ambiental).

Tal como ha sido explicado en la fase de construcción o prefabricación, y debido a que la presente etapa presenta características similares, los efectos ambientales derivados de la mano de obra no serán tenidos en cuenta. En consecuencia, en esta fase serán tenidos en cuenta los indicadores: 02 consumo de energía, 03 emisiones de CO₂, 04 toxicidad ambiental, 05 toxicidad humana y 08 residuos de construcción y derribo.

Seguidamente se presenta un cuadro de síntesis (de elaboración propia) de los indicadores de impacto ambiental, de las fases del ciclo de vida y de las principales herramientas y fuentes de información a emplear en el trabajo de análisis.



Imagen superior www.voladurasydemoliciones.es, imagen inferior www.enriquejezik.com

Cuadro de fases e indicadores	Extracción y fabricación	Transporte a obra	Construcción o montaje	Uso y mantenimiento	Derribo y residuos
01. Peso de los materiales					
02. Consumo de energía	Banco PR/PCT, programa TCQ 2000, información de los fabricantes y cálculos propios	Cálculos propios de combustible según peso y kilometraje.	Banco PR/PCT, programa TCQ 2000 y cálculos propios	En uso: programas Lider y Ecotect. En mantenimiento: fichas del ITeC y cálculos propios	Banco PR/PCT, programa TCQ 2000 y cálculos propios
03. Emisiones de CO₂					
04. Toxicidad ambiental	Datos elaborados por CIES, basados en SimaPro y Ecoinvent	Conversión a energía, emisiones y toxicidad	Conversión de la energía empleada a toxicidad ambiental y humana en base a datos elaborados por CIES, basados en SimaPro y Ecoinvent		
05. Toxicidad humana					
06. Recursos abióticos y bióticos	Valores de conversión del Wuppertal Institut			Valores de conversión del Wuppertal Institut	
07. Recursos, agua					
08. Residuos de construcción y derribo			Banco PR/PCT, programa TCQ 2000 y cálculos propios		Banco PR/PCT, proa. LIFE, cálculos propios
09. Material reciclado	Banco PR/PCT, programa TCQ 2000, información de los fabricantes y cálculos propios			Banco PR/PCT, programa TCQ 2000, información de los fabricantes y cálculos propios	
10. Material reciclable					

Nota: en el diseño de este ACV resumido el riesgo potencial de incoherencia entre bases de datos, métodos de evaluación y otras referencias será tenido en cuenta, estableciéndose la exigencia de que, en caso de producirse, no suponga cambio en las tendencias de impacto detectadas y validadas en base a referencias externas a la investigación. Dicho de otro modo, el margen de incoherencia será estudiado y limitado mediante la comparación de valores procedentes de distintas fuentes, hasta asegurar que su influencia en los resultados no pueda producir distorsiones que pongan en riesgo la validez de las conclusiones.

6.3 El cierre del ciclo de los materiales

En el punto anterior ha sido explicado el estudio ambiental -un análisis de ciclo de vida simplificado- que será desarrollado sobre las cuatro versiones del edificio tipo escogidas, determinándose los indicadores ambientales a utilizar a lo largo de las diferentes fases del ciclo de vida. La obtención de esta información hará posible conocer los distintos efectos y magnitudes del impacto ambiental correspondiente a cada sistema constructivo así como también trabajar en el diseño de propuestas de modificación tendientes a reducirlos, dando lugar a una nueva y única versión de edificio modular optimizado.

Todo ello conformará una mejora ambiental cuantificada y por tanto una ventaja desde el punto de vista de la sostenibilidad. No obstante, la reducción del impacto ambiental tiene un tope marcado por las limitaciones del sistema de producción vigente, ya que se basa en la extracción de recursos y en la generación de residuos. Por mucha mejora que pueda alcanzarse, el problema no será resuelto completamente porque el marco de gestión en el que se desenvuelve no ofrece las condiciones adecuadas para ello. Dicho en forma resumida, un estudio de impacto ambiental y sus correspondientes propuestas de reducción o mejora constituyen una estrategia paliativa frente a las demandas de la sostenibilidad.

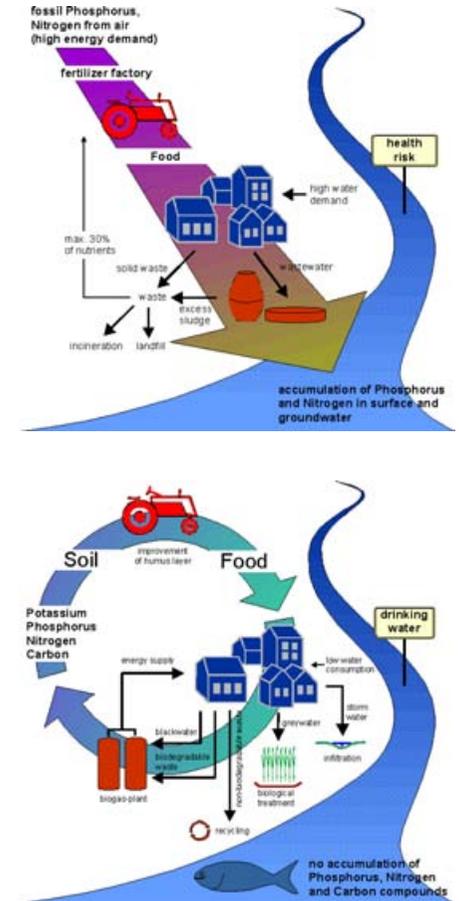
Superar el ámbito de las estrategias paliativas y entrar en el de las definitivas supone, como ha sido comentado en otros capítulos, afrontar el problema del cierre de los ciclos materiales. Y hacerlo significa trabajar desde el enfoque de la ecología industrial, que pretende dejar atrás el modelo de producción definido por la secuencia extracción>fabricación>residuo para desarrollar otro basado en el ciclo reciclaje-fabricación-reciclaje.

En un nivel de consideración general la cuestión resulta relativamente sencilla de definir, aunque cuando se aborda un problema específico, como el de un modelo experimental de gestión de ciclo cerrado para la arquitectura como el que se propone alcanzar este estudio, la diversidad y la complejidad del flujo de recursos a controlar lo dificulta significativamente.

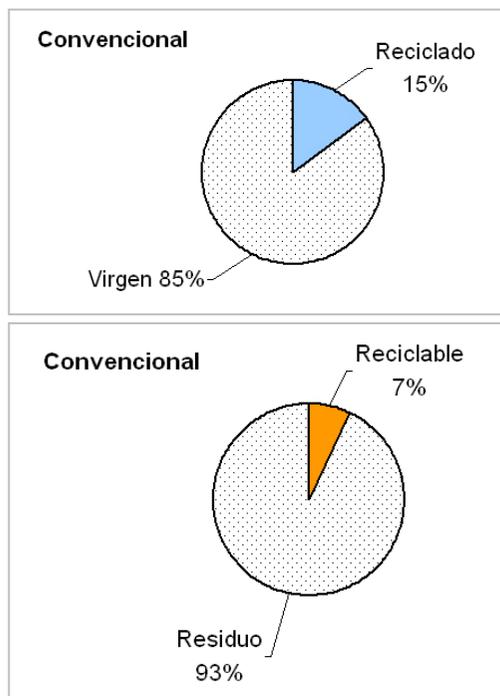
No obstante, una primera aproximación a las condiciones básicas que deberían cumplirse en un sistema de producción de ciclo cerrado podría sintetizarse en los siguientes puntos.

- Que todos los materiales sean reciclados y reciclables, que se lleve a cabo la gestión necesaria y que, por tanto, no se generen residuos a lo largo de su ciclo de vida.
- Que, en consecuencia, las energías no renovables sean sustituidas por las renovables.

De los dos recursos señalados, materiales y energía, el primero puede abordarse más directamente desde el ámbito de la construcción, ya que mediante la elección de



Sistema de gestión del agua en ciclo abierto y cerrado mediante los sistemas biosférico y técnico respectivamente. www.otterwasser.de



Ejemplos de gráficos a utilizar sobre material reciclado y reciclable, tomando como ejemplo valores estándar en Cataluña. Fuente: Progroc y estimaciones propias.

determinados productos, sistemas constructivos y mecanismos de gestión puede incidirse directamente en el flujo de materiales y residuos hacia el sentido del reciclaje [Rieradevall, Vinyets 1999], [Anderson et al. 2002]. Si bien en segundo caso la relación no es tan directa, ya que la generación de energía funciona como un sector diferenciado en la industria y para quien la emplea no siempre es posible la opción entre distintas fuentes, existe un cierto margen de incidencia mediante la selección de materiales, sistemas de movilidad y aprovechamiento de energías naturales en la propia planta de fabricación, en el sentido de la renovabilidad. No obstante y a efectos de mantener la atención puesta en el desarrollo de las técnicas de reducción de la generación de residuos y del aumento del reciclaje, este estudio se centrará en el análisis del flujo de materiales. Se opta, en el caso de la energía, por definir los niveles de renovabilidad que pueden alcanzarse a lo largo del ciclo de vida del edificio mediante de la consideración de la información facilitada por los institutos de la administración pública, las empresas generadoras de energía, los fabricantes de materiales, los transportistas y también a través de estimaciones propias.

Las cantidades, expresadas en peso, de material efectivamente reciclado y de residuos generados a lo largo del ciclo de vida del edificio representan algo así como las dos caras de una misma moneda. Mientras que la primera da una cierta dimensión sobre la condición abierta o cerrada de los ciclos materiales en positivo, la segunda lo hace en negativo. De esta manera, un sistema en el que la totalidad de los materiales se transformara en residuos sería de ciclo completamente abierto mientras que, por el contrario, un sistema donde estos recursos se reciclaran completamente sería de ciclo cerrado.

Si bien se trata de una simplificación, ya que estas situaciones habitualmente no se presentan de forma absoluta y además los flujos materiales suelen exceder los límites del sistema a considerar, la comparación entre las cantidades totales de materiales empleados a lo largo del ciclo de vida de un edificio con los residuos generados o los materiales reciclados respectivamente en el mismo período resultan indicadores útiles a la hora de medir cuánto se puede acercar, o no, la arquitectura al cierre de los ciclos materiales.

Una manera de sistematizar estos conceptos es mediante el estudio del flujo de recursos de la industria, entendida como un metabolismo cuya eficiencia ecológica puede ser parametrizada y medida. Algunos autores [Graedel, Allenby 1995] han establecido modelos de análisis dirigidos a la industria en general, cuya adaptación a las características específicas de la industria de la construcción se intentará más adelante.

El modelo de análisis, que se muestra en la imagen, desglosa el sistema de producción industrial en cuatro grandes agentes: extractores de materias primas y/o recicladores, fabricantes de productos, consumidores de productos (el término podría ser usuarios, ya que

en la mayoría de los casos no hay consumo sino uso con posterior pérdida de utilidad) y gestores de residuos. Las materias primas extraídas de la litosfera y la biosfera aportan los recursos que ponen en marcha la cadena de etapas del sistema, excretándose recursos bajo la forma de residuos en todas ellas.

La eficiencia E del sistema mide la capacidad de un metabolismo industrial para evitar succionar materias primas vírgenes y expeler residuos, que surge de evaluar las fases de extracción, fabricación, recuperación y reciclaje. $E = 1$ es la máxima eficiencia posible.

- $E_{\text{extracción}}: M / V+I$

Se optimiza a medida que aumenta el uso de materias primas recicladas y se reducen los materiales impuros, gracias al rediseño del producto y de su proceso de fabricación, a las mejoras en la calidad del material reciclado y a las tasas que gravan la extracción de materias primas vírgenes.

- $E_{\text{fabricación}}: P / P+W_{\text{fabricación}}$

Se optimiza a medida que disminuye la generación de residuos de fabricación mediante el diseño del producto y su proceso de producción para evitar mermas y favorecer la reintroducción de los materiales del producto en el proceso, las tasas que gravan los vertidos industriales, etc.

- $E_{\text{recuperación}}: S / S+W_{\text{consumo}}$

Se optimiza a medida que disminuye la generación de residuos de consumo, mediante el diseño de productos retornables, la gestión de bienes en alquiler en lugar de compra, la formación al comerciante y al consumidor, las tasas que gravan los vertidos domésticos, etc.

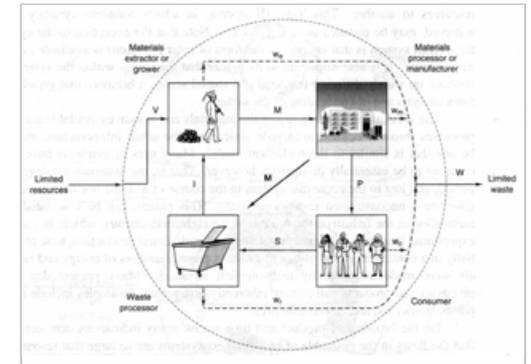
- $E_{\text{reciclaje}}: I / I+W_{\text{reciclaje}}$

Se optimiza a medida que disminuye la generación de residuos de reciclaje, mediante el diseño para el desmontaje, las técnicas de separación selectiva, las tasas que gravan los vertidos industriales, etc.

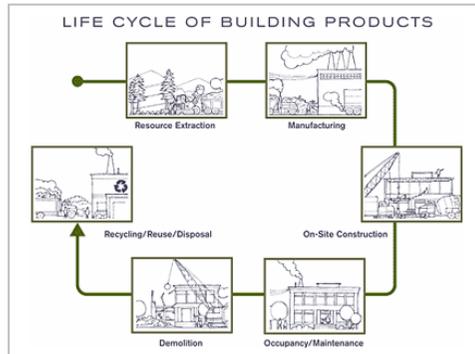
La determinación de la eficiencia ecológica de cada fase permite llegar a la ecuación que define la eficiencia de todo el sistema, cuya situación óptima con valor 1 se alcanza cuando todos los materiales son reciclados o, dicho de otra forma, cuando no se generan residuos:

- $E_{\text{sistema}}: E_{\text{extracción}} \times E_{\text{fabricación}} \times E_{\text{recuperación}} \times E_{\text{reciclaje}}$

Existe una gran similitud entre el metabolismo industrial genéricamente considerado y las características particulares de la edificación, entendida como el sector que reúne a las industrias de extracción de materias primas, fabricación de materiales, construcción de edificios, explotación y mantenimiento de inmuebles, derribo de edificios, gestión de residuos



Esquema del sistema del metabolismo industrial utilizado para medir la eficiencia ecológica de un sistema de producción. V: materias primas vírgenes, M: materiales procesados, P: productos, S: materiales recuperados, I: materiales impuros para ser tratados, W: residuos. Graedel E. R., Allenby B. R., *Industrial Ecology*, AT&T Prentice Hall, New Jersey, EEUU, 1995, ISBN 0-13-125238-0



y, finalmente, reciclaje de materiales. La caracterización de los sectores, las fases y los flujos de recursos involucrados de la ecuación descrita anteriormente puede caberle a la edificación, con algunas salvedades: en los edificios el producto final no se produce en fábrica, el período de uso es muy prolongado y el usuario no suele ser el responsable directo de los residuos finales. La fabricación in situ de productos no repetitivos (un edificio diferente en un emplazamiento distinto cada vez), la energía de uso y los materiales de mantenimiento en períodos de 50 años o más y, por último, las operaciones de derribo y los residuos generados, deben ser considerados especialmente.

La aplicación de la anterior ecuación en la edificación, por tanto, supone una adaptación a sus particularidades y, por otra parte, requiere del conjunto de industrias que forman el sector una información muy detallada sobre flujos de recursos, que habitualmente resulta muy difícil o directamente es imposible de obtener. Siguiendo el criterio expuesto en el punto 6.2 de este capítulo respecto de la simplificación del análisis que ha supuesto optar por un ACV resumido en lugar de uno convencional que, no obstante, permita mantener el rigor en la evaluación y llegar a conclusiones igualmente consistentes, el indicador del cierre de ciclo de los materiales a utilizar en esta investigación también puede ser resumido.

Un índice que sirva para medir el cierre de los ciclos materiales en la edificación, en adelante ICCM, podría basarse en información sobre los materiales empleados, los residuos generados y el material reciclado, todos ellos expresados en peso. De tal manera, la ecuación para determinar un ICCM entre los valores 0, para un ciclo completamente abierto, y 1, para el ciclo completamente cerrado, podría ser:

$$\text{ICCM} = \text{materiales reciclados} / \text{materiales empleados}$$

Los materiales reciclados surgen de la resta entre materiales empleados y residuos generados en la totalidad del ciclo de vida del edificio. Como ya ha sido comentado al comienzo de este punto, de momento queda excluida la cuestión de la energía utilizada en todos los procesos, que será retomada más adelante.

Para poder determinar los materiales empleados, los residuos generados y los materiales reciclados con cierta exactitud en cuanto a su implicación en una estrategia de cierre de los ciclos materiales resulta necesario definirlos previamente.

- **Materiales utilizados:** es la suma del peso de los materiales empleados en las fases de construcción y uso, incluidas las acciones de mantenimiento, sustitución o reposición necesarias para conservar el edificio en su calidad constructiva original a lo largo de un ciclo de vida de 50 años. No incluye los materiales afectados durante la fase de extracción de

materias primas que no forman parte del producto final (comúnmente denominados como su mochila ecológica), es decir aquel que ingresa a obra para formar parte del edificio.

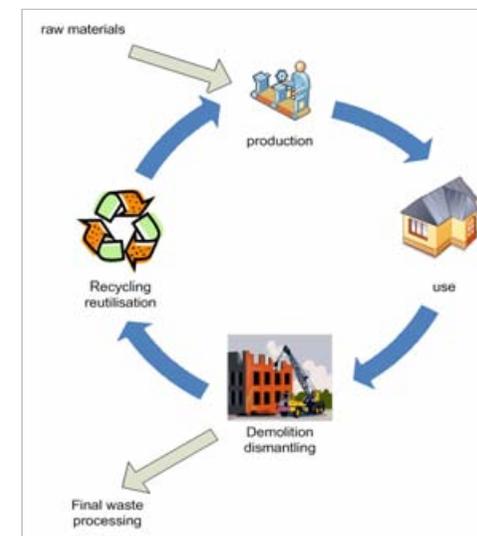
- Residuos generados: la suma del peso de los desechos producidos durante las fases de construcción, uso y derribo (o desconstrucción en los casos en que la haya) que tienen destino final en vertederos o en procesos de infraciado [McDonough, Branguart 2005].

- Material reciclado: es la suma del peso de los materiales reciclados -que también deben ser reciclables- utilizados inicialmente en el edificio y sobre los que exista la certeza que al término de su vida útil se reciclarán ya se dentro o fuera del sistema de estudio (aspecto que será estudiado en el capítulo siguiente).

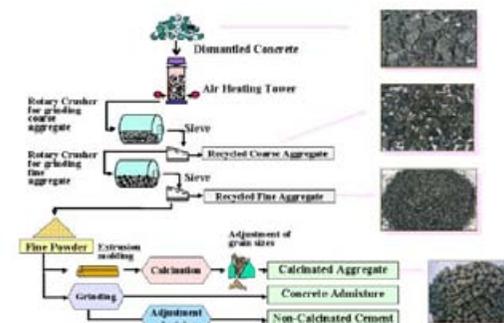
De entre los materiales reciclados se excluyen dos subgrupos: los infraciados y los reciclados parcialmente. Ambos casos presentan inconvenientes insalvables bajo las demandas del cierre del ciclo de los materiales debido a que su modelo de producción continúa necesitando tanto de la extracción de recursos como de la generación de residuos, si bien en menor medida que en el caso de los materiales no reciclados.

En relación con los materiales infraciados, es decir aquellos que si admiten un número limitado de ciclos de reciclaje, el problema es que ciclo a ciclo van perdiendo la calidad necesaria para su utilización en las aplicaciones originalmente previstas. Un ejemplo de este tipo de materiales, que si bien alargan su vida útil no logran regenerarse, es el que se obtiene de reciclar la mezcla de residuos plásticos de la recogida urbana, cuya calidad no sólo es inferior a la que tenían los compuestos con los que ha sido fabricado -que ya no podrán ser recuperados- sino que continuará perdiendo prestaciones técnicas hasta que al cabo de pocos ciclos más el material acabará convirtiéndose en un residuo.

En relación con los materiales reciclados parcialmente, es decir aquellos que si bien permiten un número ilimitado de ciclos de reciclaje no admiten que la totalidad de la materia prima provenga de usos anteriores, el problema se centra en que su modelo de producción continúa dependiendo de las extracciones de recursos y del vertido de residuos, afectando ambos al medio natural. Aunque en menor grado que en el caso de los materiales no reciclables, tanto el consumo de materias primas vírgenes que se emplean como parte de los insumos como la generación de residuos contaminantes, provenientes del material que no es posible reciclar, continúan. Un ejemplo de este tipo de materiales, que si bien disminuyen el problema del ciclo abierto no logran cerrarlo, es el hormigón armado. En el caso de España, por ejemplo, la norma EHE o Instrucción Española de Hormigón Estructural permite incorporar en la fabricación de nuevos hormigones estructurales sólo una quinta parte de árido grueso reciclado²⁴ proveniente de la demolición de estructuras de hormigón. Queda



Las principales entradas y salidas de recursos en el ciclo de la construcción es donde se concentra la oportunidad de cerrar ciclos. Materias primas de fabricación de materiales y residuos de demolición. Imagen: www.intron.nl



Esquema del procedimiento usual para el infraciado del plástico. Imagen: www.epd.gov.hk



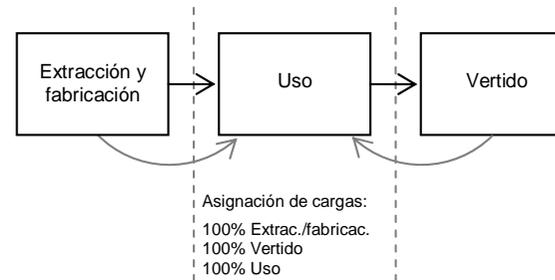
La lana de roca es un ejemplo de un material reciclable que, debido a dificultades de separación selectiva, habitualmente no se recicla.
Imagen: www.alibaba.com

claro que tanto las cuatro quintas partes de árido restantes continuarán proviniendo de pedreras naturales, como que los escombros de hormigón que no puedan ser introducidos en la fabricación de nuevo hormigón seguirán teniendo final en los vertederos de residuos de la construcción.

Otra discusión que es importante abordar dentro de una estrategia de cierre de ciclos materiales es la asignación de cargas ambientales [Rieradevall et al. 2005] y los límites del sistema en estudio, pues a partir de ella podrán definirse los valores que pueden adjudicarse a los distintos tipos de materiales cuyo flujo será analizado.

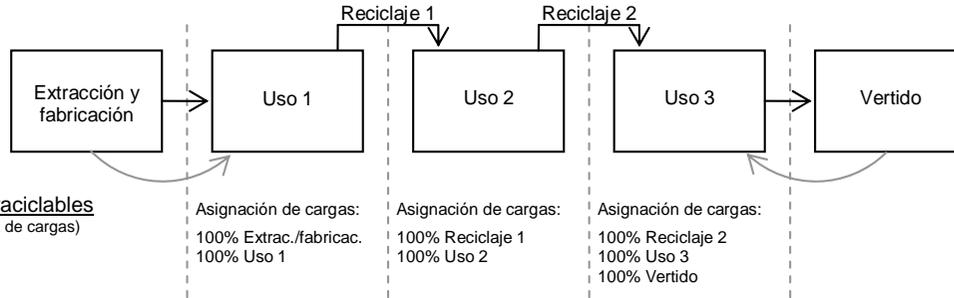
A partir de lo expuesto en los párrafos anteriores cabe decir que desde la consideración del cierre del ciclo de los materiales la clasificación de los mismos admite cuatro tipos diferentes: a) no reciclables, b) infraciclables, c) reciclables parcialmente y d) reciclables. Naturalmente, cada uno de ellos tiene leyes de asignación de cargas ambientales diferentes.

En el caso de los materiales no reciclables sólo existe la posibilidad de un ciclo de uso, asociando directamente a la fase anterior de fabricación así como a la posterior de vertido de los residuos. La asignación de las cargas ambientales de ambas fases sobre el único ciclo de uso posible es del 100% y por tanto la totalidad del impacto ambiental del ciclo de vida le será asignada.

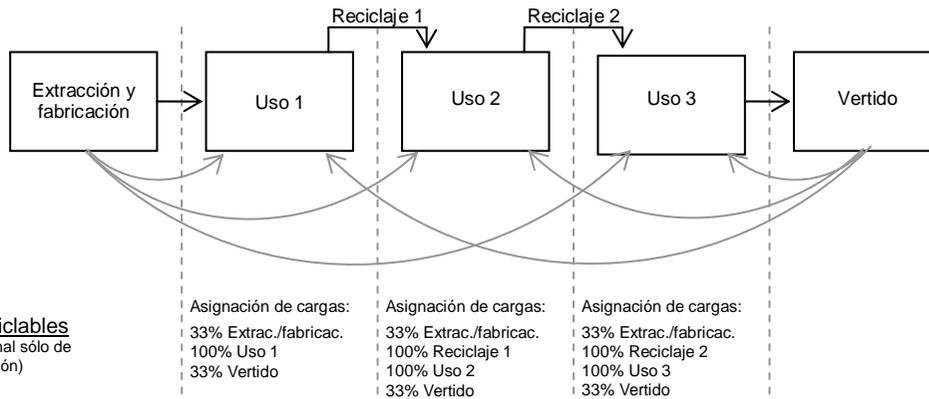


Materiales no reciclables

En el caso de los materiales infraciclables (ejemplo: mezcla de plásticos de recogida urbana fundidos), en los que existen dos o más ciclos de uso, además de las fases de fabricación y de vertido deben tenerse en cuenta los reciclajes que se realizan a partir del primer uso, cuyas cargas ambientales también afectan al ciclo de vida del material. La distribución de esa afectación admite varias interpretaciones, siendo posible tanto la asignación de cargas ambientales en forma directa entre una y otra etapa como la repartición proporcional de los impactos en los distintos usos. Bajo la primera forma las cargas correspondientes a la fabricación se asignan al primer uso y las del vertido al último, asumiendo cada uso intermedio el reciclaje de los residuos de la etapa anterior más, naturalmente, sus propias cargas



Bajo la segunda forma las cargas de fabricación y de vertido se reparten igualitariamente entre todos los usos y las de reciclaje en forma directa aunque esto provoca ciertas distorsiones ya que, según este esquema, tendría menos impacto ambiental un material fabricado a partir de materias primas vírgenes que recicladas (ya que el primer uso no asume ninguna carga proveniente de reciclaje).



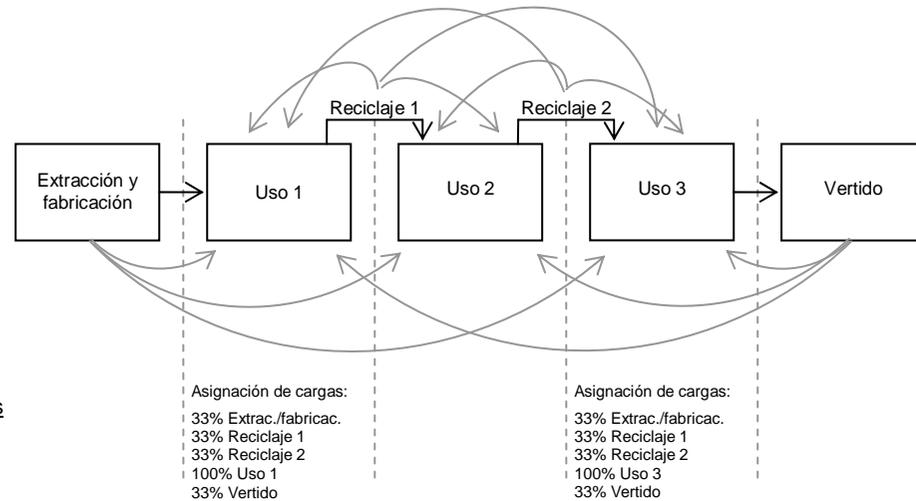
A partir de aquí sería posible intentar una tercera interpretación, en la que las cargas de los reciclajes también se repartan igualitariamente entre los distintos usos, de manera que todos los impactos ambientales que se producen durante el ciclo de vida del producto repercutan de igual manera sobre los distintos usos, independientemente de que sean el primero, el último o uno intermedio



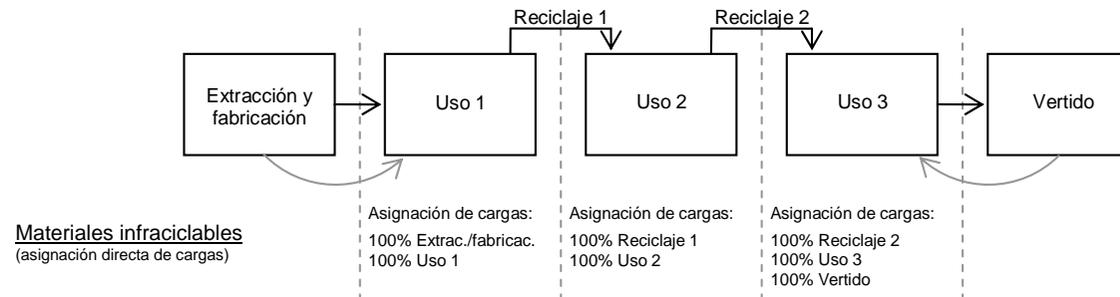
El plástico, cuando es mezclado, es un ejemplo de un material infraciclable.
Imagen: www.alibaba.com



El pavimento continuo a base de distintos compuestos de caucho reciclado (imagen superior) es otro ejemplo de material infraciclable. Una vez instalado no es posible recuperar los compuestos originales. Un pavimento fabricado sólo con caucho y colocado sin adherir (imagen inferior), en cambio, puede recuperarse con suficiente grado de pureza y volver a reciclarse.



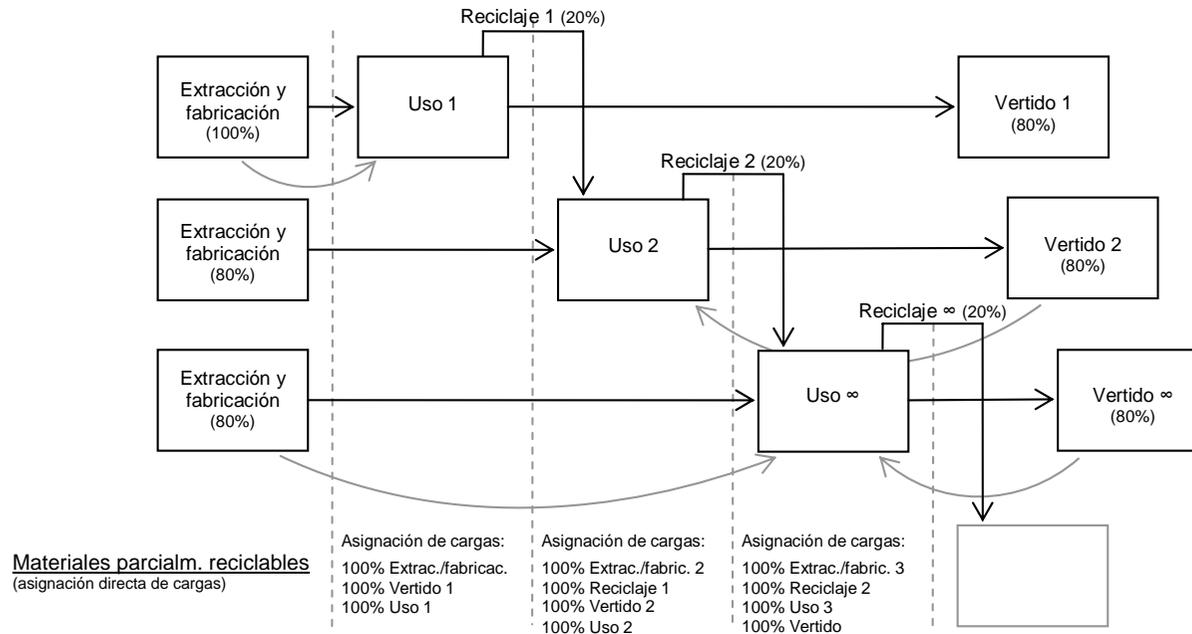
Si bien desde un punto de vista teórico resulta sencillo definir uno u otro tipo de asignación de cargas sobre los usos de los materiales infraciclados, cuando se pasa a la práctica la cuestión se complica porque entran a jugar las dificultades propias de un mercado tan diverso como el de la construcción. En los materiales infraciclados no siempre es posible saber cuántos ciclos de reciclado se realizarán antes de que los compuestos sean descartados por no alcanzar la calidad mínima requerida para un nuevo uso. Asimismo, un mismo compuesto puede contener componentes con diferentes cantidades de usos en su historial y por tanto con diferente vida útil por delante, pudiendo afectar de esta manera la cantidad de usos prevista originalmente para todo el compuesto. Y sin el número de usos a tener en cuenta la repartición de las cargas ambientales de fabricación, reciclaje y vertido no puede establecerse. De allí que prevalezca la interpretación de la asignación directa de las cargas, es decir la que cuenta los impactos de fabricación en el primer uso, los del vertido en el último y los de cada reciclaje en el inmediato posterior



En el caso de los materiales parcialmente reciclables (ejemplo: hormigón con un una parte del árido grueso reciclado) la asignación de las cargas ambientales se hace bajo las formas de los materiales no reciclables y reciclables teniendo en cuenta la proporción en la que participan en la compuesto. De tal forma, los efectos ambientales de la fabricación y el vertido afectarán directamente a la parte de material no reciclable mientras que los derivados de las operaciones de reciclaje lo harán sobre la parte de material reciclable. Así, mientras que al primer ciclo de uso se le asigna la totalidad de las cargas de fabricación (ya que el material no incorpora reciclados), las cargas del vertido deben ser proporcionales a la parte de material que no podrá ser reciclado. A partir del segundo ciclo, cuando se incorpora material reciclado, las cargas de fabricación y de vertido se ajustarán a la parte de material no reciclado (y no reciclable) y las operaciones de reciclaje continuarán constantes.



El hormigón, tal como es considerado en la norma española EHE vigente, es un ejemplo de un material parcialmente reciclable.
Imagen: www.alibaba.com



El esquema anterior podría analizarse también bajo la consideración de la distribución proporcional de las cargas ambientales tal como ya se ha hecho en el caso de los materiales infraciclables ya que podría plantearse, por ejemplo, que la fabricación del material en el primer ciclo es indispensable para el segundo ya que si éste no existiera no podría ser reciclado luego. Desde este punto de vista los efectos ambientales de la fabricación inicial, y



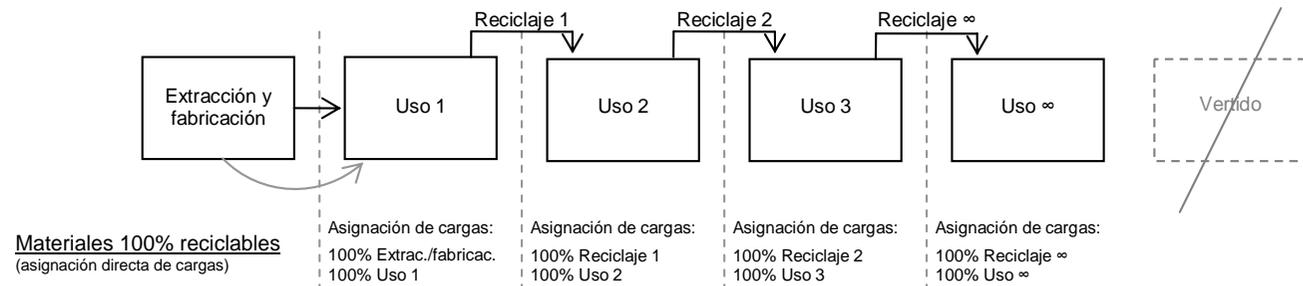
El acero, gracias a la tecnología de hornos de arco voltaico, es un ejemplo de un material completamente reciclable en el ciclo industrial. www.superuse.com

análogamente los de su vertido, deberían repartirse proporcionalmente entre ambos ciclos, pudiendo ocurrir luego lo mismo entre las fases segunda y tercera, tercera y cuarta, etc.

Este razonamiento, que parece quedar claro en el caso de los materiales infraciclos donde a partir del primer ciclo ya no hay fabricación a partir de material virgen sino sólo reciclado, pierde consistencia en los materiales reciclados parcialmente cuando se tiene en cuenta que a cada ciclo de uso le corresponden fases de fabricación, reciclaje y vertido.

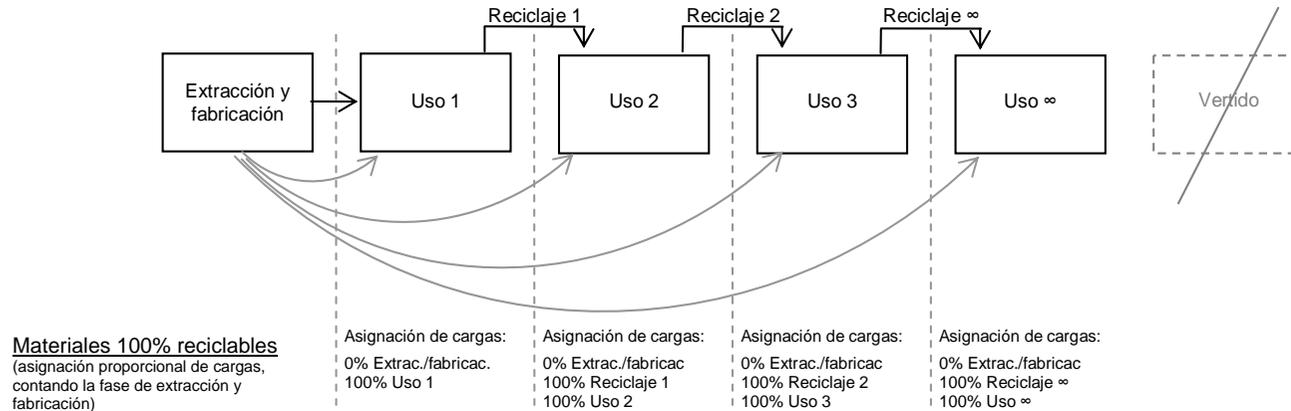
A partir del segundo ciclo, que es cuando comienza a incorporarse una fracción de material reciclado, y durante todo el ciclo de vida del material estas tres fases se mantienen en idéntica proporción y por tanto su repercusión podría considerarse constante. Parece tener sentido, en consecuencia, mantener la asignación directa de cargas ambientales a cada ciclo siguiente cuando se trata de materiales reciclados parcialmente.

El caso de los materiales completamente reciclables presenta una consideración algo distinta, ya que a partir del primer ciclo la fabricación desaparece por completo y es reemplazada por el reciclaje. Tampoco tiene lugar aquí el vertido, no al menos en términos teóricos, ya que el material está concebido para poder ser reaprovechado completamente y, en todo caso, si se producen pérdidas éstas se deben a dificultades de gestión a lo largo del ciclo de vida que a los efectos de la determinación de los flujos materiales en este caso no serán consideradas. A partir de todo ello y en relación a la asignación de las cargas ambientales una primera posibilidad es, al igual que en los casos anteriores, considerar su asignación al ciclo inmediato posterior. De esta manera el primer ciclo recibe los efectos ambientales de la fabricación a partir de materias primas vírgenes mientras que a los siguientes se les asignan las de reciclaje, siempre de manera directa. A continuación se expone el gráfico que representa este esquema de distribución.



Naturalmente es posible preguntarse si no debiera considerarse que, debido a que los ciclos dos, tres, y posteriores necesitan del material de la fase anterior para reciclarlo dando lugar al

nuevo, la asignación de cargas de la fabricación no debería distribuirse entre todos ellos. En efecto, de no hacerlo se produce la paradoja de que el primer y segundo ciclos, aun siendo inmediatos y perteneciendo a la misma cadena de producción que será utilizada durante toda su vida útil, tienen cargas ambientales completamente distintas. Desde este último enfoque los efectos de la primera y única fabricación deberían repercutir sobre todos los ciclos posteriores, representándose ello tal como se muestra a continuación.



En el cuadro anteriormente descrito y frente a la decisión a tomar sobre asignar directa o proporcionalmente las cargas ambientales en el caso de los materiales completamente reciclables aparece un elemento decisivo, que es cómo determinar el número de ciclos posibles. En materiales como el acero y bajo ciertas condiciones de producción como por ejemplo la utilización de hornos de arco voltaico cuando admiten que la totalidad de las materias primas provengan del reciclaje, es decir de la recolección de chatarra, el número de ciclos de reciclaje que puede realizarse técnicamente no tiene límite. Haciendo abstracción de momento sobre las pérdidas cualitativas o cuantitativas que pueda representar la gestión del material a lo largo de su ciclo de uso, es posible reciclar el acero cuantas veces sea necesario sin que se produzcan mermas en su calidad. Todo ello lleva a considerar que el número de ciclos posibles es infinito y, por lo tanto, también lo es el divisor al que deberían someterse las cargas ambientales de la primera fabricación dando por resultado cero, sea cual sea el dividendo. Tendiendo en cuenta que, bajo un sistema de gestión que sea capaz de evitar las pérdidas de material, el vertido no existe, se concluye en que bajo la forma de repartición proporcional sólo deben tenerse en cuenta los efectos ambientales de uso y reciclaje para cada ciclo posterior.

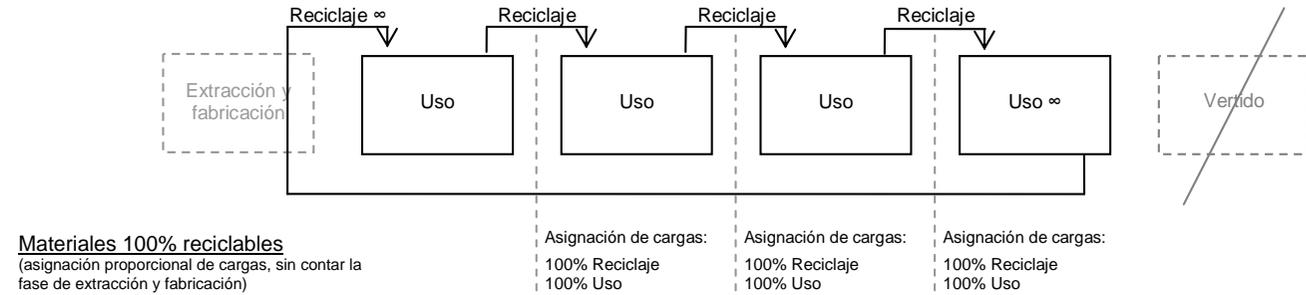


La madera, si no se alteran sus características naturales, es un ejemplo de un material completamente reciclable en el sistema biosférico (mediante su reincorporación a la naturaleza por compostaje).
Imagen: www.superuse.com



La madera, si no se alteran sus características naturales, es un ejemplo de material completamente reciclable en el sistema técnico (por ejemplo en la fabricación de tableros de partículas).
Imagen: www.pacificlandscapesupply.com

A partir de lo anteriormente expuesto y volviendo a ambos esquemas posibles para la asignación de cargas ambientales en el caso de los materiales reciclados, es decir la directa y la proporcional, puede verse que a partir del segundo ciclo los efectos ambientales que cargan sobre cada uno de ellos son iguales, reduciéndose al conteo del uso y reciclaje.



Esta cuestión simplifica enormemente la consideración de los impactos y permite establecer una conclusión importante de cara a la definición de los materiales que serán utilizados en el prototipo modular optimizado que será estudiado en los capítulos siguientes: todos ellos deben ser completamente reciclables puesto que es la única manera de evitar pérdidas o, dicho de otro modo, de cerrar los ciclos materiales. La contabilización del uso de materiales completamente reciclados, de acuerdo con el enfoque metodológico empleado, implica dos ahorros de impactos ambientales: a) el que supone comenzar un nuevo ciclo a partir de la regeneración del material recuperado en lugar la extracción y fabricación habituales (que frecuentemente representa un ahorro en energía, emisiones y otros impactos) y b) el que supone no tener que transportar y gestionar los residuos al final de la vida útil del los materiales (que también redunda en ahorros de energía, emisiones y otros impactos).

Cabe aclarar, no obstante, que los esquemas presentados representan una aproximación al tema. En la práctica los estereotipos mostrados no suelen presentarse exactamente de tal forma o bien no es posible conocer con exactitud el esquema de sus flujos materiales. El cálculo exergético comentado en el Capítulo 1 constituiría una gran ayuda en tal sentido, pues permitiría una valoración exacta. Se trata de una contabilidad compleja en la que ya es posible disponer de algunos valores para un número limitado de materiales, elaborados entre otros autores por A. Valero, E. Botero y A. Martínez y presentados en su trabajo Evolución y perspectivas del uso de la energía y los materiales [Gutiérrez, Naredo 2005]. No obstante ello, su aplicación en el sector de la edificación es aún muy incipiente.

Referencias bibliográficas y de otras fuentes de información:

- [Anderson et al. 2002] J. Anderson, D. Shiers, M. Sinclair, *The Green Guide to Specification*, Building Research Establishment & Blackwell Publishing, Bodmin, Reino Unido, 3ra edición, 2002 ISBN 063205961.
- [Aranda et al.2006] A. Aranda, I Zabalza, A. Martínez, A. Valero, S. Scarpellini, *El análisis del ciclo de vida como herramienta de gestión empresarial*, Fundación CONFEMETAL, Madrid, España, 2006, ISBN 849616974X.
- [ARC 2006] Equipo técnico de la ARC, *Revisió del Programa de Gestió de Residus de la Construcció a Catalunya 2004-2006* (documento), Agència de Residus de Catalunya, Generalitat de Catalunya, Barcelona, 2006
- [CIES 2001] Centre d'Iniciatives de l'Edificació Sostenible, Treballs de recerca previs per a la redacció del Llibre Blanc per a l'Etiquetatge Verd dels productes per a la construcció (doc. elect.), COAC, CAATB, UPC, ITEC, Institut Cerdà, financiamiento de la Generalitat de Catalunya, Barcelona, 2001. [Fullana, Puig, 1997] P. Fullana y R. Puig, *Análisis de ciclo de vida*, Rubes Editorial, Barcelona, 1997, ISBN 8449700701.
- [Glover 2001] Joanna Glover, *Wich is better? Concrete or Wood: A comparison...* (tesis doctoral), Department of Chemical Engineering University of Sydney, Australia, 2001.
- [Fullana, Puig, 1997] P. Fullana y R. Puig, *Análisis de ciclo de vida*, Rubes Editorial, Barcelona, 1997, ISBN 8449700701.
- [Graedel, Allenby 1995] Graedel E. R., Allenby B. R., *Industrial Ecology*, AT&T Prentice Hall, New Jersey, EEUU, 1995, ISBN 0-13-125238-0
- [Hammond, Jones 2007], J. Hammond, C. Jones, *Inventory of Carbon & Energy (ICE)* (doc. elect.), University of Bath, Reino Unido, 2007.
- [Hegger et al. 2006] M. Hegger, V. Auch-Schwelk, M. Fuchs, T. Rosenkranz, *Construction materials manual*, Birkhäuser edition Detail, Munich, Alemania, 2006, ISBN 3764375701.
- [ITeC TCQ 2006] *Programa TCQ 2000* (versión 3.2), ITeC, Barcelona, España, 2006.
- [ITeC BEDEC 2006] *Banco BEDEC PR/PCT* (versión 2006), ITeC, Barcelona, España.
- [ITeC prog 2000] Equipo técnico del ITeC, *Programa d'ajuda a la realització del Pla de gestió de residus*, Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya i Agència de Residus de Catalunya, Barcelona, España, 2000.
- [ITeC 1991] Equipo técnico del Àrea de construcció existent de l'ITeC, *Manteniment de l'edifici. Fitxes*, Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya, Barcelona, 1991, ISBN 8478530304.
- [Mañá et al. 2003] F. Mañá (Dir.), A. Cuchí, D. Castelló, G. Diez, A. Sagrera, *Parámetros de sostenibilidad*, Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya, Barcelona, España, 2003, ISBN 8478534611.
- [Marsh 2007] A. Marsh et al., Programa *ECOTECH* (versión), Western University, Australia, 2007.
- [McDonough, Branguart 2005] W. McDonough, M. Branguart, *Cradle to cradle*, McGraw-Hill Interamericana de España, Madrid, España, 2005.
- [Min. Vivienda, IDAE 2007] Programa *LIDER* (versión 1.0), Ministerio de la Vivienda e Instituto de Diversificación y Ahorro Energético, España, 2007.

[Rieradevall, Vinyets 1999] J. Rieradevall, J. Vinyets, *Ecodiseño y ecoproductos*, Rubes Editorial, Barcelona, 1999, ISBN 84-497-0074-4.

[Rieradevall et al. 2005] Joan Rieradevall (Dir.), *Ecofanal. Ecodisseny d'elements urbans 2005-2006*, Universitat Autònoma de Barcelona / Generalitat de Catalunya, Barcelona, España, 2005.

[SaAS et al. 2007], J. Sabaté, A. Cuchí, A. Sagrera, G. Wadel, F. López, A. Moreno, J. Vidal, S. Cantos, *Estudio de reducción de emisiones de CO₂ en un conjunto de 60 VPO* (doc. electr.), Sabaté associats Arquitectura i Sostenibilitat, Barcelona, España, 2007.

[SETAC 2003] Shpresa Kotaji, Agnes Schuurmans, Suzy Edwards, *Life-Cycle Assessment in Building and Construction: A State-of-the-Art Report*, Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 2003 ISBN 9781880611593.

[Wooley, Kimmins 2000] Tom Wooley, Sam Kimmins. *Green Building Handbook* (volúmenes 1 y 2), Spoon press, Londres, Reino Unido, 2000, ISBN 0419253807 y 0419253807.

[WRAP 2007-1] Waste & Resources Action Programme, WAS 003-003: *Offsite Construction Case Study, Waste Reduction Potential of Precast concrete Manufactured Offsite* (doc. electr.), Oxon, Reino Unido, 2007.

[WRAP 2007-2] Waste & Resources Action Programme, WAS 003.003 *Offsite Construction Case Study Waste reduction potential of offsite manufactured pods* (doc. electr.), Oxon, Reino Unido, 2007.

[WRAP 2007-3] Waste & Resources Action Programme, WAS 003-003: *Offsite Construction Case Study, Waste Minimisation through Offsite Timber Frame Construction* (doc. electr.), Oxon, Reino Unido, 2007.

[WRAP 2007-4] Waste & Resources Action Programme, WAS 003-003: *Offsite Construction Case Study, Waste Reduction Potential of Offsite Volumetric Construction* (doc. electr.), Oxon, Reino Unido, 2007.

[Wuppertal 2003] *Material intensity of materials, fuels, transport services* Version 2; 28.10.2003 (doc. electr.), Wuppertal Institute for climate environment and energy.

Notas:

¹ “La tipología de edificio de viviendas más representativa en nuestro país es el bloque de viviendas de cuatro y cinco plantas, la cual representa el 21,2 % de los edificios construidos”. Estrategia de ahorro y Eficiencia Energética de la Edificación en España 2004-2012, Sector Edificación, de 5 de 2003, según datos del Censo de Viviendas de 1991 del INE.

² Sistema constructivo más utilizado en la construcción de edificios de vivienda en Cataluña, basado en estructura de hormigón armado in situ, cubierta plana invertida, cerramientos verticales de obra cerámica, carpinterías de aluminio, pavimentos de terrazo y cerámica, revestimientos de mortero monocapa y yeso, etc. Se define en detalle en el capítulo 7.

³ Diversas publicaciones y estudios realizados sobre impacto ambiental de la edificación de viviendas producidos entre 2000 y 2007 por el Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya, el Centre d’Iniciatives per a l’Edificació Sostenible de Catalunya, SaAS arquitectes, Societat Orgànica y otros.

⁴ Normas y informes técnicos producidos por ISO dentro de la serie 14040 (Gestión ambiental – Análisis de Ciclo de Vida):

- ISO 14040: Norma sobre Gestión Ambiental – Análisis de Ciclo de Vida – Principios y estructura (1997). Ofrece una visión general de la práctica, aplicaciones y limitaciones del ACV en relación a un amplio rango de usuarios potenciales, incluyendo aquellos con un conocimiento limitado sobre el ACV.
- ISO 14041: Norma sobre Gestión Ambiental – Análisis de Ciclo de Vida – Definición de Objetivos y Alcance y Análisis de Inventario (1998). Recoge los requerimientos y directrices a considerar en la preparación, aplicación o revisión crítica del análisis del inventario de ciclo de vida (la fase del ACV referente a la recogida y cuantificación de los consumos y emisiones relevantes que se producen en el ciclo de vida de un producto).
- ISO 14042: Norma sobre Gestión Ambiental – Análisis de Ciclo de Vida – Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida (2000). Ofrece una guía sobre la fase del ACV consistente en la evaluación de impactos (que tiene por objeto la evaluación de los impactos ambientales potenciales y significativos a partir de los resultados del análisis de inventario).
- ISO 14043: Norma sobre Gestión Ambiental – Análisis de Ciclo de Vida – Interpretación del ciclo de vida (2000). Ofrece una guía sobre la interpretación de los resultados del ACV en relación con la definición de objetivos del estudio, incluyendo una revisión del alcance del ACV, así como del tipo y calidad de los datos utilizados.

⁵ La construcción, en general, posee ciertas características diferenciales respecto del resto de la industria que hacen especialmente difícil la aplicación de métodos y herramientas de ACV sobre los edificios, ya que es difícil disponer de la información necesaria para construir los escenarios de cada fase con exactitud y la incertidumbre respecto de aspectos no definidos o que pueden cambiar durante el ciclo de proyecto y obra es muy elevado. La construcción no tiene una localización específica (la obra se sitúa en un emplazamiento diferente cada vez), cambia permanentemente de producto (el edificio a construir es un proyecto diferente cada vez), altera constantemente los sistemas constructivos que intervienen en ellos (a veces aún sobre la marcha de la obra) y emplea una gran cantidad de productos cuya composición resulta desconocida o de muy difícil representación. Por todo ello la realización de estudios de ACV completos en edificios resulta extremadamente compleja, costosa y de difícil aprovechamiento respecto de la aplicabilidad de las conclusiones que pueden obtenerse en futuros proyectos (que serán muy diferentes), limitándose habitualmente la aplicación de estos métodos y herramientas a la realización de ACV resumidos sobre edificios o bien ACV completos pero focalizados en objetos de análisis más simples y previsibles como soluciones constructivas o materiales específicos.

⁶ Bases de datos (Ecoinvent, Buwal 250, Data File, ETH-ESU, Idemat, Ecoinvent, Franklin, Ivam, etc), metodologías (Ecoindicator-95 y -99, CML 1992, CML 2, Ecopoints 97, Edip/UMIP 96, EPS 2000, etc), programas genéricos de ACV (Boustead, Eco-it, Ecopro, Ecoscan, Euklid, KCL Eco, Gabi, LCAit, Miet, Pems, SimaPro, Team, Wisard, Humberto, etc.) y programas específicos de ACV para el sector de la edificación (Eco-Quantum, Legep, Equer, Athena, Egip, Eco-Soft, Envest, Becost, Bees, Greencalc, EcoEffect, etc.). La mayor parte de las bases de datos existentes están relacionadas con tecnologías y materias primas procedentes del norte o del centro de Europa, que no siempre son extrapolables a la situación de España, debido a las diferencias sustanciales existentes entre los países de la UE en cuanto a sistemas de producción, tipos de energía empleada, repercusión de transporte considerada, climatología, técnicas de construcción, etc.

⁷ Entre otros, pueden contarse los siguientes estudios de ACV resumidos de edificios:

- Cuatro casos emblemáticos en España presentados a la Conferencia Internacional SB'08, en Melbourne (55 viviendas bioclimáticas de protección pública en Bermeo, Vizcaya; Centro de recursos ambientales, Valladolid; 38 viviendas para personas mayores, Palma de Mallorca; Sunrise: 130 viviendas sociales en Vallecas, Madrid) evaluados con la herramienta sobre sostenibilidad de los edificios, SBTool-Verde de iiSBE-España. Habitat Futura N° 18, febrero de 2009, pp. 20-22.

-
- A. Cuchí, A. Sagrera, G. Wadel, F. López, A. Moreno, J. Vidal, S. Cantos, *Estudio de reducción de emisiones de CO₂ en un conjunto de 60 VPO* (doc. Elec., consulta on line, 02/09 www.saas.cat), Sabaté ass. Arquitectura i Sostenibilitat, 2007.
 - Casos emblemáticos presentados por Equipo español del Green Building Challenge a la Conferencia Internacional Sustainable Building 2005, en Tokio (entre otros: Edificio de viviendas San Cristóbal, Madrid; Edificio de viviendas Pau Claris, Barcelona; Edificio de oficinas Trasluz, Madrid; Centro Nacional de Energías Renovables, Sariguren), evaluados con las herramientas de evaluación de la sostenibilidad de los edificios Verde y GBTool
 - M. Cepeda e I. Mardaras Larrañaga, *Cuantificación energética de la construcción de edificio y el proceso de urbanización o los proyectos*. Revista Con Arquitectura Nº 12 de 2004 pp. 65-80.
 - Societat Orgànica, *Evaluación de impacto ambiental y propuesta de posibles mejoras en el ciclo de vida del sistema modular de viviendas Compact Habit y Evaluación medioambiental del sistema constructivo MEBSS según las emisiones de CO₂ a lo largo del ciclo de vida de los edificios* desarrollados por encargo de las empresas Constructora d'Aro, S.A. y Pellicer i Fills, S.A. respectivamente (comunicación verbal, consulta 02/09, www.societatorganica.com).

⁸ Tal es el caso, por ejemplo, de la herramienta SBTool-Verde de iiSBE-España, que realiza la evaluación de sostenibilidad de los edificios mediante la valoración de sus impactos a lo largo del ciclo de vida mediante los indicadores de Emisiones netas de GHG (kgCO₂/m²/año), Emisiones de sustancias destructoras de la capa de ozono (KgCFC-11/m²/año), Eutrofización de las aguas (KgPO₄/m²/año), Emisiones de gases acidificantes (KgSO₂/m²/año), Agotamiento de los recursos no renovables, Generación de residuos (Kg/m²/año) y Reducción de costes de construcción y uso (euros/m²/año).

⁹ La reducción del consumo de energía de la etapa de uso de los edificios, así como las emisiones de CO₂ asociadas, es el objetivo de la mayoría de las normativas que persiguen una reducción del impacto ambiental en el sector de la edificación, que actualmente afectan la redacción del proyecto de los edificios (también lo es la gestión de residuos sólidos, pero en la etapa de obra). Dando cumplimiento a la Directiva europea de Eficiencia energética de los edificios, la normativa de edificación recientemente aprobada en España, principalmente el Código Técnico de la Edificación (CTE) así como el Real Decreto de Certificación Energética, (RD 47/2007) y, en el ámbito autonómico catalán el Decreto de Ecoeficiencia limitan el consumo de energía o bien establecen una calificación de los edificios respecto de su eficiencia energética.

¹⁰ Como por ejemplo el Protocolo de Kyoto alcanzado en 1997 y puesto en marcha en 2005 gracias a la ratificación de un número de países equivalente al 55% de la generación de CO₂ del mundo, con el objetivo de reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero GEI, relacionados por tanto con el calentamiento de la atmósfera.

¹¹ A. Cuchí y A. Pagés, *Sobre una estrategia para dirigir al sector de la edificación hacia la eficiencia en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI)*, Ministerio de la Vivienda, octubre de 2007. Consulta on line, 02/2009, www.mviv.es

¹² La liberación del sulfuro, los óxidos del nitrógeno, el amoníaco y los metales pesados, por ejemplo, provocan el aumento de la acidificación y la toxicidad del suelo que afecta a la flora y a las aguas superficiales y subterráneas.

¹³ Algunas de las bases de datos ambientales que pueden utilizar los programas informáticos de evaluación de ACV son Ecoinvent, Buwal 250, Data File, ETH-ESU, Idemat, Ecoinvent, Franklin, e Ivam.

¹⁴ Entre los métodos de evaluación de impacto más difundidos en los estudios de ACV se cuentan Ecoindicator-95 y -99, CML 1992, CML 2, Ecopoints 97, Edip/UMIP 96, EPS 2000, etc.

¹⁵ Por ejemplo, y avanzando en el desarrollo de la investigación que se presenta en los capítulos siguientes, en los valores de energía de fabricación de materiales establecidos en el banco de partidas de edificación BEDEC PR/PCT del Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya en algunos casos han sido detectados valores muy altos o muy bajos si se los compara con otras fuentes de información. En tales situaciones se consultaron diversas bases de datos (reseñadas en la bibliografía del Capítulo 7 hasta poder establecer un valor contrastado para el material sobre el cual se había notado una distorsión. Otro tanto ocurrió con la evaluación de la demanda de la energía de climatización en el uso de los edificios que fueron simulados con las herramientas LIDER y Ecotect (la primera por ser de uso público y la segunda por considerarse idónea para el tipo de simulación a realizar, además de por haberse podido acceder a su uso). En efecto, si bien en las tendencias generales existía una coherencia entre los resultados obtenidos de ambas herramientas, en los valores cuantitativos no fue así. Fue necesario considerar esos resultados no ya en la dimensión de la etapa que se estaba considerando –el uso de los edificios- sino en la totalidad del ciclo de vida, pudiéndose comprobar de esta manera que una de las dos herramientas se acercaba a los valores estándar de repercusión de la fase en el ciclo y, en consecuencia, la otra fue descartada en cuanto a su uso cuantitativo. Ambas cuestiones, la valoración energética de los materiales y el cálculo de la demanda de energía de uso de los edificios se retomarán en el capítulo 7.

¹⁶ Hasta un 90% de la energía y de las emisiones de CO₂ en el ciclo de vida a 50 años de un edificio de viviendas de construcción convencional se producen en las fases de fabricación de materiales y uso, según un estudio realizado por el estudio de arquitectura SaAS, la asesoría ambiental Societat Orgànica y la ingeniería de clima Vidal [SaAS et al. 2007].

¹⁷ Código Técnico de la Edificación, Real Decreto de Certificación Energética de Edificios, leyes y decretos autonómicos sobre ecoeficiencia y ordenanzas municipales sobre energías solares térmica y fotovoltaica.

¹⁸ En la evaluación de materiales se consideró utilizar los programas *EcoCalculator* e *Impact Estimator* del Athena Institute de Canadá (<http://www.athenasmi.org/>), que representan la materialidad del edificio a partir de polígonos compuestos por capas. Finalmente no fue posible pues no la representación de los sistemas constructivos considerados no era posible.

¹⁹ Entre los técnicos de la edificación que se dedican a estudios ambientales existe una opinión generalizada sobre la necesidad de crear una base de datos ambientales estatal, en la que se defina una metodología común española, mediante protocolos para la obtención de la información, las fases del ciclo de vida a considerar, cómo repercutir el contenido de reciclado, cómo asignar las cargas ambientales, etc. Esta tarea, que podría ser desarrollada por los agentes del sector y liderada por organismos públicos, cuenta con antecedentes en el grupo AENOR AEN/CTN 41/SC 9 Construcción sostenible.

²⁰ Observatorio de costes del transporte de mercancías por carretera, Dirección General de Transportes por Carretera, Secretaría General de Transportes del Ministerio de Fomento de España, Abril de 2007, entre otras fuentes de información.

²¹ *Guía práctica de la energía. Consumo eficiente y responsable*. IDAE, 2007.

²² Encuesta sobre el suministro y tratamiento del agua, de 2006, Instituto Nacional de Estadística de España, INE.

²³ Programa de acciones técnicas para fomentar la valorización, minimización y selección de residuos originados en las obras de construcción y demolición llevado adelante en 2000 por el ITeC y la entonces Junta de Residus de Catalunya que actualmente se denomina Agència de Residus de Catalunya, perteneciente a la Generalitat de Cataluña.

²⁴ En otros países este porcentaje es mayor, llegándose a producir hormigones con 100% de árido reciclado.