

Análisis de Ciclo de Vida: herramienta para la reducción del cambio climático en el sector de la construcción

Sindy Suárez Silgado, Xavier Roca, Miquel Casals, Santiago Gassó, Quirze Vilella, Marta Gangolells, Núria Forcada, Alba Fuertes, Marcel Macarulla.

Universidad Politécnica de Cataluña

RESUMEN

Uno de los problemas que más amenazan el bienestar de la sociedad actual debido al aumento cada vez mayor de las emisiones de CO₂ al medio, es el fenómeno del cambio climático. El sector de la industria es uno de los que más contribuyen a dicho fenómeno debido, entre otros factores, al consumo energético. Por ello, crece cada vez más el interés de atribuir responsabilidades a las industrias con el fin de que sus actividades contribuyan en menor medida a los impactos ambientales, encontrándose de este modo implícito el concepto de Responsabilidad Social Empresarial (RSE) también en el sector de la construcción. Con base a esto, se promueve el empleo de herramientas o metodologías con el fin de conocer, evaluar y reducir la energía empleada en una edificación. En este trabajo se evalúa un edificio de oficinas ubicado en Girona (España) y se determina la cantidad total de energía consumida en las fases del ciclo de vida y la energía total de las diferentes fachadas simuladas, mediante el empleo de la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida. Los resultados encontrados ponen de manifiesto que la fase operacional es la responsable del mayor consumo energético y de una mayor emisión de CO₂ al ambiente en todas las fachadas evaluadas, por lo tanto es la que más contribuye al fenómeno del cambio climático. Tanto en la etapa operacional, como en todo el ciclo de vida, el mejor escenario corresponde al escenario 3 (todas las fachadas con fábrica cerámica revestida, sin cámara de aire y aumento del aislamiento térmico en un 50%) y el más desfavorable ambientalmente por su mayor contribución al cambio climático, corresponde al edificio con fachadas de muro cortina.

Palabras clave: Cambio climático, Análisis de Ciclo de Vida, eficiencia energética, emisiones de CO₂, edificación, Responsabilidad Social Empresarial.

INTRODUCCIÓN.

En la atmósfera existen una serie de gases de efecto invernadero como el vapor de agua (H₂O) y el dióxido de carbono (CO₂) que absorben y emiten la radiación infrarroja. Estos gases contribuyen a que el planeta tenga una temperatura apta para la vida, constituyéndose de este modo en un fenómeno natural. El problema actual, consiste en que las concentraciones de estos gases, especialmente las de CO₂ están aumentando. Este cambio ha puesto en peligro los ecosistemas naturales, el desarrollo económico y social, la salud y el bienestar de la humanidad.

De acuerdo con Monahan et al. (2011) tanto los combustibles fósiles como la manufactura del cemento, son responsables de más del 75% del incremento del CO₂ atmosférico desde la pre-industria del siglo XVIII. Sin embargo, una importante contribución de estas emisiones se debe también a la construcción y ocupación de edificios. Según Jiménez Cañabate (2009), en Europa los edificios consumen el 40% de la energía.

Por estos problemas ambientales, cada vez más crecientes, se tiende a atribuir responsabilidades a las empresas o industrias con el fin de que sus actividades contribuyan en

menor medida a los impactos ambientales. Por ello, uno de los temas de la cumbre mundial sobre desarrollo sostenible celebrada en Johannesburgo en septiembre de 2002 fue el de la Responsabilidad Social Empresarial (en adelante RSE) entendida según Navarro (2007), Kang et al. (2010) y Vargas et al. (2005) como la contribución decidida de las empresas a la sostenibilidad, es decir, las empresas deben tener en cuenta en las decisiones que toman, no sólo las consecuencias económicas, sino también las sociales y medioambientales de las actividades que realizan, pasando de este modo a estar incluido el tema del cambio climático dentro del ámbito empresarial.

Concretamente a lo que se refiere a las implicaciones de la industria de la construcción en el actual cambio climático, varios países y organismos internacionales han tomado medidas con el fin de que esta asuma la responsabilidad de los impactos que genera. Por esto, la Unión Europea tiene entre sus objetivos mejorar la eficiencia energética para cumplir con el Protocolo de Kyoto de reducir sus emisiones globales en al menos un 20% respecto a los niveles de 1990 para el año 2020.

Consecuentemente a la política Europea en materia de eficiencia energética, se han realizado diferentes estudios que muestran la importancia de conocer y evaluar la energía empleada durante todo el ciclo de vida de una edificación. Así mismo, se ha venido realizando una clara distinción de las energías implicadas dentro del proceso constructivo. Según Dixit et al. (2010) y Ramesh et al. (2010), la energía incorporada tiene que ver con los materiales de construcción durante todo el proceso de producción, construcción, demolición final y disposición; y la energía operacional, es aquella empleada en el mantenimiento del medio ambiente interior del edificio.

Cabe resaltar que hasta hace poco se consideraba sólo la energía operacional en el momento de evaluar energéticamente un edificio. Sin embargo, debido a la aparición de equipos electrodomésticos y materiales de aislamientos eficientes energéticamente, además de las nuevas formas de obtención de energía, cada vez se le está dando un peso mayor a la energía incorporada dentro del proceso constructivo. Esta idea se ve apoyada por varios investigadores como Blengini et al. (2010) quien señala que el papel y la importancia relativa de las fases del ciclo de vida de una edificación están cambiando, sobre todo para construcciones nuevas y de baja energía. Para Hastings et al. (2007); Blengini et al. (2010) y Monahan et al. (2011), la energía operacional se encuentra lejos de ser la energía que más contribuye a los impactos del ciclo de vida en edificios de baja energía, debido a la alta carga medioambiental incorporada que estos presentan.

Considerando además, que la nueva Directiva 2010/31/UE sobre eficiencia energética de los edificios menciona en uno de sus apartados que en el 2020 todos los edificios nuevos deben tener un consumo de energía casi nulo, es importante tener en cuenta y darle valor a la energía incorporada que hasta el momento no se incluye dentro de los cálculos de eficiencia energética. De este modo, la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida, en adelante ACV, (la cual incluye tanto la energía operacional, como la incorporada), permite conocer los impactos ambientales en todo el ciclo completo de una edificación.

OBJETIVOS

El objetivo principal de este artículo consiste en mostrar el papel que juega el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) en el proceso de reducción del impacto del cambio climático (beneficio para la sociedad), asociado al sector de la construcción. Para ello resulta imprescindible mejorar la eficiencia energética en el sector, a partir de una monitorización exacta de su consumo

energético. Los objetivos específicos de este estudio son:

- 1) Determinar la cantidad total de energía consumida en las fases del ciclo de vida de un edificio de oficinas, para conocer cuál de estas fases presenta una mayor implicación en el fenómeno del cambio climático.
- 2) Conocer la energía total de las diferentes fachadas simuladas en el edificio, con el fin de saber cuáles son las que más castigan nuestro entorno respecto al calentamiento global del planeta.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

CAMBIO CLIMÁTICO

El clima de la tierra depende de muchos factores, como la concentración atmosférica de aerosoles y gases de efecto invernadero, la cantidad de energía proveniente del sol o las propiedades de la superficie terrestre; cuando estos factores varían ya sea a través de procesos naturales o humanos, producen un calentamiento o enfriamiento del planeta porque alteran la proporción de energía solar que se absorbe o se devuelve al espacio (González, 2010). De este modo, el cuarto informe de evaluación del IPCC (Panel Intergubernamental del Cambio Climático) del año 2007, define al cambio climático como un “cambio en el estado del clima identificable a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos. Denota todo cambio del clima a lo largo del tiempo, tanto si es debido a la variabilidad natural como si es consecuencia de la actividad humana”.

Tal y como se había mencionado anteriormente el clima de la tierra depende entre otros factores del efecto invernadero, que es un fenómeno natural gracias al cual se mantiene una temperatura media constante en la tropósfera y en la superficie de la tierra, el problema está en que la concentración atmosférica del dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y halo carbonos (grupo de gases que contienen flúor, cloro o bromo) se están incrementando, principalmente el dióxido de carbono, que es el gas más predominante por su volumen (Rey Francisco et al. 2006; Monahan et al. 2011). Este gas representa tres cuartas partes del total y más del 90% de este es de origen energético, de esto se deduce la importancia de las políticas de eficiencia energética de limitar las emisiones de CO₂ (Rey Francisco et al. 2006).

Contribución del sector de la construcción al cambio climático

Según Dixit et al. (2010) la industria de la construcción es una de las industrias que más requiere recursos naturales, tanto renovables como no renovables, consumiendo el 40% de la energía total y el 16% del agua anual.

Así mismo, Monahan et al. (2011) destaca que el sector de la construcción no sólo consume energía, sino que también causa contaminación ambiental y emisión de gases de efecto invernadero que conducen al cambio climático (casi un cuarto del total de las emisiones de CO₂ son atribuidas al uso de energía en los edificios). Esta problemática se ve apoyada por Aranda Usón et al. (2010) quien afirma que las emisiones directas de los gases de efecto invernadero por el uso de los edificios, han crecido en España en un 57% en la última década del siglo XX y las ligadas a la industria de la construcción en un 54%.

Por lo mencionado anteriormente, se hace necesario revisar y modificar la actual práctica de construcción, mediante nuevos diseños y métodos de ingeniería, técnicas de construcción y tecnologías de producción. De acuerdo con Pulselli et al. (2007) una política ambiental para la industria de la construcción podría ser optimizar el uso de recursos manteniendo a la vez una alta calidad. Para ello se requiere una detallada monitorización y gestión dentro de la industria de la construcción que permita calcular la entrada de materia y energía en los edificios y evaluar así el comportamiento del entorno construido.

Cambio climático y Responsabilidad Social Empresarial (RSE)

Desde las dos últimas décadas del siglo pasado, el comportamiento de las empresas viene evolucionando hacia una competitividad empresarial que se basa no sólo en la obtención de beneficios económicos, sino también en actuaciones que favorezcan su entorno social y medioambiental. Por ello, el tema del cambio climático se encuentra entre las prioridades de los gobiernos en todo el mundo y ha llegado también al ámbito empresarial. De este modo, el cuidado del medio ambiente se ha convertido en un componente intrínseco de la Responsabilidad Social Empresarial, definida en forma generalizada para designar el compromiso de las empresas respecto a las cuestiones demandadas por la sociedad (Méndez, 2005; Vargas et al. 2005). Navarro (2007) y Kang et al. (2010) definen también a la RSE como la contribución decidida de las empresas a la sostenibilidad, es decir, las empresas deben tener en cuenta en las decisiones que toman no sólo sus intereses, sino las consecuencias sociales y medioambientales de sus actividades. De este modo, también la industria de la construcción debe hacerse cargo de los impactos que causan sus actividades en el medio y su influencia directa con los problemas ambientales globales, especialmente con el fenómeno del cambio climático y por ello debe buscar herramientas o mecanismos que minimicen el impacto. Una de estas herramientas es el Análisis del Ciclo de Vida (ACV).

ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA (ACV)

Según la norma ISO 14040, el ACV se define como una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto (o servicio) mediante un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema, una evaluación de los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas y una interpretación de los resultados de las fases de inventario e impacto en términos de los objetivos del estudio.

En el estudio del ACV existen 4 fases de acuerdo con la ISO 14040:

- a) Definición del objetivo y el alcance.
- b) Análisis del inventario.
- c) Evaluación del impacto ambiental.
- d) Interpretación.

Etapas del ACV de los materiales de construcción

De acuerdo con Pacheco B. (2009) el ciclo de vida de los materiales de construcción consta de las siguientes etapas:

- a) Extracción y procesado de las materias primas: Se trata de la primera etapa del ciclo de vida

de un material de construcción. (Consiste en la obtención y posterior tratamiento de las materias primas) Los mayores impactos medioambientales asociados a las actividades de extracción de materiales son típicamente el agotamiento de los recursos naturales, los desechos generados por la propia actividad y el consumo de energía.

b) Producción y fabricación del material: En esta fase se elabora el material en sí y se ajusta para la obtención de un producto. La fase de producción o fabricación de los materiales de construcción representa igualmente otra etapa de su ciclo de vida con abundantes repercusiones medioambientales. Esto viene asociado al consumo de energía, a emisiones a la atmósfera de CO₂, polvo en suspensión, ruidos y vibraciones, vertidos líquidos al agua, residuos y el exceso de consumo energético.

c) Construcción: Llegado a este punto del ciclo, el material es empleado en la construcción para la cual ha sido diseñado.

d) Empleo y uso: En esta fase, las consideraciones relativas al impacto ambiental están relacionadas con la emisión de sustancias nocivas tanto al interior (afectando a la salud), como al exterior (afectando a la calidad de aire, agua y suelo).

e) Demolición: Consiste en destruir una construcción, pero actuando con cierto orden, que permita agilizar la operación. Se pretende agredir lo menos posible el ambiente circundante, eliminando los componentes constructivos sistemáticamente, con la intención de que puedan ser aprovechados.

f) Tratamiento como residuos/reciclaje: La fase final del ciclo de vida de los materiales de construcción coincide con su tratamiento como residuos. Estos residuos, además de proceder de la demolición de obras al final de su vida útil, pueden originarse también como materiales de rechazo de obras de nueva planta o de reformas.

Una vez llegado a este punto, el ciclo de vida de un material de construcción volvería a empezar. Los productos obtenidos a través del reciclaje se incorporarían a la primera etapa del ciclo sustituyendo parcialmente a las materias primas naturales. El proceso completo del ciclo de vida tal como se ha descrito suele denominarse “desde la cuna a la tumba”.

TIPOS DE ENERGÍA EN EL ACV

Existen dos tipos de energía dependiendo de las etapas del ciclo de vida en que esta es consumida: energía operacional y energía incorporada.

a) Energía operacional

La energía operacional es la energía necesaria para mantener las condiciones de confort y el mantenimiento diario del edificio; es decir, la energía necesaria para la calefacción, ventilación, aire acondicionado, agua caliente sanitaria, iluminación y para las aplicaciones en ejecución. Esta energía operacional varía largamente con el nivel de confort requerido, las condiciones climáticas y los horarios de operación (Ramesh et al. 2010).

En términos energéticos, el sector de la edificación representa aproximadamente el 17% del consumo de energía final nacional, correspondiendo un 10% al sector doméstico y el 7% restante al sector terciario.

El sector terciario está formado por un subgrupo de establecimientos bastantes dispares entre sí, tales como oficinas, pequeños comercios, supermercados, grandes superficies, restaurantes, hoteles y museos. Este subsector es responsable del 9% del consumo de energía final nacional (9258 ktep), repartidos de la siguiente manera: oficinas 53%, comercio 23%, hostelería 12%, hospitales y centros de educación 12%. En oficinas, el consumo se debe fundamentalmente a iluminación, equipos ofimáticos y climatización. Al igual que ha sucedido con el sector residencial, el sector servicios ha experimentado un aumento en el consumo de energía del 83,6% en el período 1990-2008, siendo responsable de aproximadamente 10000 kilotoneladas de CO2 equivalente (Aranda Usón et al. 2010).

Los edificios del sector terciario, tienen un menor peso en cuanto a superficie, pero por su utilización y su mayor equipamiento energético consumen más energía que el sector residencial. Por ello, se contempla la necesidad de mejorar la eficiencia energética y fomentar el ahorro y el uso de energía renovables en los mismos.

Como la energía operacional es por lo general la que presenta el mayor valor cuando se trata de edificios o viviendas convencionales, se han estudiado estrategias para su conservación y reducción como es el uso de electrodomésticos eficientes energéticamente y el uso de materiales aislantes avanzados (paredes y ventanas con mucho aislamiento) (Ramesh et al. 2010). Así mismo, se han empleado bloques de suelo estabilizados y bloques de ceniza volante. A pesar de esto, existen investigaciones (Huberman et al. 2008) en las que se demuestra que la energía incorporada también cuenta un porcentaje importante dentro del ciclo de vida de la energía.

b) Energía incorporada

En el sector de la edificación se entiende por energía incorporada a la energía utilizada durante la fase de manufactura del edificio. Es la energía contenida en todos los materiales empleados en la construcción (utilizada en la adquisición de los materiales o excavación, manufactura y transporte al sitio del edificio) y en las instalaciones técnicas, y la energía gastada en el tiempo de montaje o construcción y renovación del edificio (Ramesh et al. 2010; Dixit et al. 2010).

De acuerdo con (Ramesh et al. 2010) la energía incorporada se divide en dos partes: la energía incorporada inicial y la energía incorporada recurrente.

a. Energía incorporada inicial: Es la energía gastada en la construcción inicial del edificio.

b. Energía incorporada recurrente: La energía utilizada para la para la rehabilitación y mantenimiento del edificio.

A pesar de que la energía incorporada constituye el menor porcentaje de la energía de los edificios construidos de forma convencional (entre 10 % y 20% del total de energía según Ramesh et al. (2010)), también se han estudiado estrategias para contribuir a su reducción. Un número de estudios (Ramesh et al. 2010) han evaluado el potencial para reducir esta energía en los edificios a través del uso de materiales reciclables, materiales de baja intensidad energética y el uso de materiales disponibles localmente.

METODOLOGÍA

La metodología llevada a cabo para la realización de este estudio consistió primeramente en una búsqueda de información por medio de diferentes fuentes acerca del cambio climático y la eficiencia energética. Una vez detectada la problemática ambiental con respecto a los impactos energéticos de la construcción, se efectuó una introducción del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) en este sector. Fue necesario también buscar información acerca de los diferentes tipos de energía que se encuentran dentro del ACV. Posteriormente, se definió detalladamente el edificio de estudio con el objetivo de describir la geometría, los sistemas constructivos y los sistemas de iluminación, calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria (ACS). A continuación se hicieron siete variaciones del tipo de fachada, resultando en total 8 escenarios de estudio.

Después de definir los escenarios, se evaluó el consumo energético y las emisiones de CO₂ generadas por el edificio a lo largo de todo el ciclo de vida en cada uno de ellos. Para esto fue necesario recurrir a diferentes bases de datos como el ITEC (Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya) y la base de datos del Software SimaPro 7. Además, para conocer la energía consumida durante la fase de uso se utilizaron los programas LIDER v1.0 y CALENER VYP v1.0.

CASO DE ESTUDIO

Descripción del edificio de estudio

El edificio de referencia (Figura 1) está formado por seis plantas (una de ellas es un semisótano) con una superficie construida total aproximada de 11000 m² y una altura constante de 3,5 m por planta. Aproximadamente un 20% de sus fachadas son ventanas. El edificio consta de diferentes espacios térmicos, debido a los diferentes usos de los espacios interiores. Como es un edificio de uso terciario (de oficinas) se determinó un uso de alta intensidad de 12 horas diarias. Además, se consideró para el edificio una vida útil de 50 años.

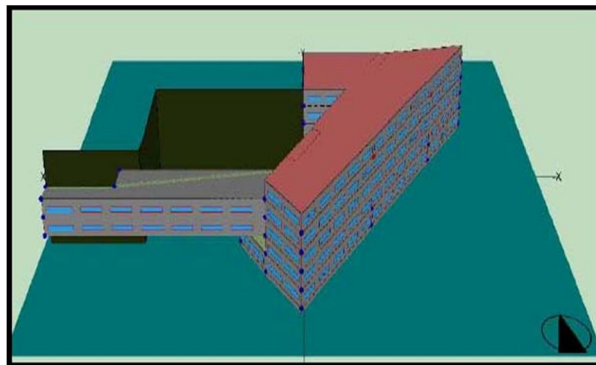


Fig. 1. Edificio de referencia.

Elementos constructivos analizados

Los elementos constructivos analizados fueron:

a) Estructura: La estructura del edificio está formada por la unión de tres tipologías diferentes. La mayor parte está compuesta por hormigón armado in situ, también hay una parte de la estructura de tipo metálica y otra de madera.

b) Forjado sanitario: En contacto con el terreno y separaciones horizontales entre plantas.

c) Cubiertas: El edificio de estudio presenta dos tipologías de cubiertas: una cubierta transitable que tiene una composición semejante a la de un forjado y dos no transitables que se diseñaron para soportar una carga menor.

d) Fachadas: En cuanto a las fachadas el edificio presenta tres tipologías bien diferenciadas: la tipología más extensa es la fachada ventilada, la segunda tipología es la medianera que es la fachada situada en contacto con el edificio antiguo y la tercera tipología es el muro cortina. De este modo, el escenario 1 (edificio de referencia) se encuentra definido de la siguiente manera: fachada sur-este con muro cortina y resto de fachadas con fábrica cerámica revestida, aislamiento térmico y cámara de aire. Los valores pertenecientes a las transmitancias térmicas (U) son: $U=0.62 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, para la fachada de obra cerámica revestida ventilada y $U=0.92 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ para la fachada de muro cortina.

e) Ventanas: Están formadas por vidrios dobles de baja emisividad y cámara de aire sin ventilar (4/20/6) que utiliza un marco metálico con rotura de puente térmico.

Sistema de acondicionamiento y confort

a) Calefacción y refrigeración: El sistema de climatización del edificio es un sistema de zonas independientes mediante bomba de calor. Este sistema proporciona refrigeración y calefacción a cada zona de forma directa, sin la necesidad de unidades interiores.

b) Agua Caliente Sanitaria (en adelante ACS): En el edificio de oficinas estudiado se supuso un total de 600 trabajadores y se consideró unos 18 m^2 como superficie libre para cada trabajador y un volumen de 55 m^3 . Por ello, la demanda de ACS para el edificio tipo resultó ser de $1800 \text{ l ACS/día} = (600 \text{ personas por } 3 \text{ litros según CTE})$. El nuevo código exige un cierto porcentaje de contribución solar mínima cuando la demanda se encuentra entre 50-5000 l/día. Como Girona pertenece a la zona climática III, según el CTE se debe hacer una contribución mínima con energía solar del 50%. Por ello, la producción de agua caliente sanitaria en el edificio tipo se hace a través de un calentador de agua a gas (natural) sin acumulador y con la posibilidad de usar placas solares.

c) Iluminación: La iluminación del edificio tiene una potencia de 138.888 W . Es importante tener en cuenta que el total de la superficie de las fachadas está conformado por un 20% de ventanas y que el muro cortina situado en la fachada sur-este, también proporciona luz natural. La potencia de iluminación por m^2 de superficie construida es de $12,6 \text{ W}$.

Los tres principales combustibles considerados fueron: el carbón, el gas natural y el petróleo. El carbón y el gas natural para la generación de energía eléctrica y el petróleo para la obtención del diesel necesario en el funcionamiento de los diferentes vehículos y maquinarias.

Definición del sistema de estudio

Límites del sistema: Los límites del sistema se definieron teniendo en cuenta las diferentes etapas en que se evaluó el edificio:

a) Producción: incluye la extracción y el transporte de las materias primas hasta la fábrica, la elaboración y transporte de los componentes hasta la obra, y el transporte de hormigón hasta el sitio de construcción.

b) Construcción: abarca la maquinaria para el movimiento de tierras, el funcionamiento de la hormigonera, el transporte, montaje, funcionamiento y desmontaje de la torre grúa y el funcionamiento de la planta elevadora de hormigón.

c) Desmantelamiento: incluye la maquinaria pesada para el derrumbe de las partes difíciles de desmontar a mano o con pequeñas herramientas y el transporte de todos los materiales del edificio hasta la recogida selectiva.

Unidad funcional: De acuerdo con Güereca Hernández (2006) la unidad funcional sirve de base para la comparación entre sistemas. A partir de ella se cuantifican las entradas y salidas funcionales de un sistema productivo o de servicios. Para la metodología propuesta se escogió como unidad funcional la unidad de superficie 1 m^2 .

Escenarios estudiados

Con el fin de evaluar el consumo energético y conocer el comportamiento ambiental de diferentes tipos de fachadas se estudiaron, además del edificio de referencia (escenario 1), los siguientes escenarios:

Escenario	Fases no operacionales		Fase operacional	
	Energía Total Incorporada (kW/m ²)	Total emisiones (kgCO ₂ /m ²)	Energía Total Operacional (kW/m ²)	Total emisiones (kgCO ₂ /m ²)
Escenario 1	1959,32	683,63	4018,19	1004,55

Tabla 1. Energía y emisiones totales en las fases del ciclo de vida del edificio de

- Escenario 2: Edificio de referencia, sin muro cortina. Todas las fachadas con fábrica cerámica revestida, cámara de aire y aislamiento ($U = 0.62 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$).
- Escenario 3: Todas las fachadas con fábrica cerámica revestida, sin cámara de aire y aumento del aislamiento térmico en un 50% ($U = 0.46 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$).
- Escenario 4: Fábrica cerámica revestida, sin aislamiento térmico y aumento de la cámara de aire ($U = 0.91 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$).
- Escenario 5: Edificio de referencia, sin revestimiento de fábrica cerámica ($U = 0.61 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$).
- Escenario 6: Edificio con fachadas de muro cortina, menos la medianera que es con obra de fábrica ($U = 0.92 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$).
- Escenario 7: Edificio con fachadas de paneles de sándwich metálico, con placa aislante de poliuretano, a excepción de la medianera que es con obra de fábrica ($U = 0.86 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$).
- Escenario 8: Edificio con fachadas de paneles de sándwich hechas con material compuesto (poliéster reforzado con fibra de vidrio), aislamiento con placa de poliuretano ($U = 1.01 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

a) Energía y emisiones del ciclo de vida del edificio de referencia

Para conocer la energía del ciclo de vida del edificio de estudio, fue necesario hallar tanto la energía consumida durante el uso del edificio, como la energía incorporada relativa a la fabricación, transporte, colocación y demolición.

Como se mencionó anteriormente, para la obtención de la energía operacional fue necesario el empleo de los programas LIDER y CALENER y para la obtención de la energía incorporada las bases de datos del Software SimpaPro y del ITEC (Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya).

En la Tabla 1 y Figuras 2 y 3, se muestran los resultados tanto de energía, como de emisiones de todo el ciclo de vida del edificio de referencia (todos los resultados son presentados por metro cuadrado construido). Si se comparan entre sí la fase operacional y las fases no operacionales del edificio, se puede ver que la fase de utilización del edificio (operacional) es la que más consume energía y por lo tanto, es la que emite mayores emisiones de CO₂ al ambiente, contribuyendo de este modo en mayor medida al fenómeno del cambio climático..

En las Figuras 2 y 3 se puede observar el porcentaje de cada una de estas energías y emisiones en el escenario 1. El 41% de las emisiones de CO₂ corresponden a las fases no operacionales, es decir, aquellas que hoy en día no son consideradas por la ley a la hora de evaluar energéticamente un edificio. Así mismo, el 33% corresponde al total de energía incorporada. Este resultado coincide con el estudio efectuado por Zabalza Bribián et al. (2011) quien encontró que la proporción de energía incorporada en los materiales usados varía entre 2% y 38% en edificios convencionales. Aunque la energía incorporada constituye un menor porcentaje con respecto a la operacional, es importante tenerla en cuenta para la toma de decisiones en la construcción de edificios sostenibles.



Fig. 2. Energía total del edificio de referencia (%).

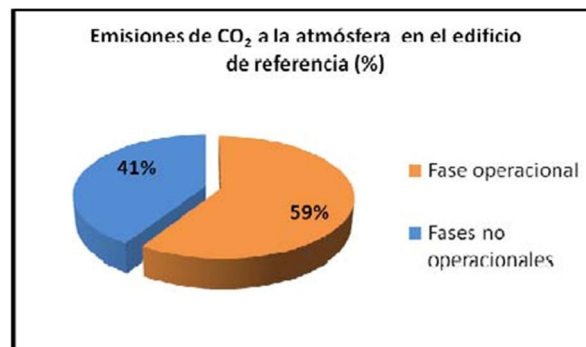


Fig. 3. Emisiones totales de CO₂ del edificio de referencia (%).

b) Energía y emisiones totales de los diferentes escenarios. Comparación con el edificio de referencia

- **Fase operacional**

Como se observa en la Tabla 2, los consumos de energía por ACS e iluminación son constantes en todos los escenarios, por ello se tienen en cuenta para la comparación sólo los valores de calefacción y refrigeración. Sin embargo, es importante destacar, al igual que Aranda Usón et al. (2010), que los mayores consumos energéticos de un edificio de oficinas se deben a la iluminación.

En la Tabla 2, también se observa que el mayor valor de energía operacional total se presenta en el escenario 6 (edificio con fachadas de muro cortina), esto puede deberse a que este sistema de fachada lleva implícito un mayor consumo energético durante los meses de verano, reflejado en los mayores consumos de energía por refrigeración. Por el contrario, el escenario

3 (todas las fachadas con fábrica cerámica revestida, sin cámara de aire y aumento del aislamiento térmico en un 50%) es el que presenta un menor consumo energético. Este menor consumo energía por calefacción se debe al aumento del aislamiento térmico.

Al comparar el escenario 3 con el de referencia se puede apreciar que el valor de energía consumida se reduce en un 0,01%. En el caso del escenario 6, éste aumenta en un 0,07%. En general estos resultados presentan muy poca variabilidad.

Para el caso de las emisiones de CO2 (Tabla 3) se observa, como era de esperar, que entre mayor es el consumo energético, son mayores también las emisiones. Por lo tanto, las mayores emisiones se presentan en el escenario 6 y las menores en el escenario 3 (todas las fachadas con fábrica cerámica revestida, sin cámara de aire y aumento del aislamiento térmico en un 50%), siendo este último el más favorable ambientalmente por su menor contribución al cambio climático y él único que presenta un valor inferior en cuanto a emisiones de CO2 con respecto al edificio de referencia. En la Tabla 3, se ve claramente que el escenario 6 se encuentra en un 6,97% por encima del escenario de referencia y que las emisiones totales del escenario 5 son iguales al escenario 1.

Escenarios	Producción (kW/m2)	Construcción (kW/m2)	Desconstrucción (kW/m2)	Total Incorporada (kW/m2)	% Incorporada
Escenario 1	1889,09	42,66	27,57	1959,32	
Escenario 2	1884,98	42,84	28,16	1955,99	-0,17
Escenario 3	1889,14	42,66	27,57	1959,37	0,00
Escenario 4	1886,87	42,77	27,57	1957,21	-0,11
Escenario 5	1878,58	42,51	27,02	1948,12	-0,57
Escenario 6	1907,43	42,45	26,38	1976,26	0,86

Tabla 4. Energía consumida en las fases no operacionales (kW/m2)
Energía consumida en las fases no operacionales (kW/m2)

Escenario 7	1945,05	42,41	26,35	2013,82	2,78
Escenario 8	1874,88	42,38	26,39	1943,65	-0,80

Con los resultados expuestos anteriormente se ve reflejado que en la etapa operacional (etapa de uso), el mejor escenario, tanto por consumo energético como por emisiones, corresponde al escenario 3.

- **Fases no operacionales**

Los resultados de energía incorporada y los valores de emisiones de CO2 se analizan en tres etapas bien diferenciadas: producción, construcción y desmantelamiento o desconstrucción.

Como se puede ver en la Tabla 4, el mayor valor de energía incorporada se presenta en el escenario 7 (edificio con fachadas de paneles de sándwich metálico, con placa aislante de poliuretano, a excepción de la medianera que es con obra de fábrica), siendo un 2,78% mayor que el escenario de referencia. Este aumento se debe al mayor consumo energético en la producción de los paneles metálicos. Así mismo, el escenario más favorable es el escenario 8 (edificio con fachadas de paneles de sándwich de poliéster reforzado de fibra de vidrio, aislamiento con placa de poliuretano), sin embargo, este presenta una reducción muy pequeña con respecto al escenario original ya que se encuentra por debajo sólo en un 0,80%. También, se observa en todos los escenarios, que la etapa de producción es la que más contribuye en el

resultado final, ya que es la que presenta el mayor consumo de energía incorporada. En el edificio de referencia esta etapa corresponde a un 96%, le sigue la etapa construcción con un 2,2% y la de desconstrucción con un 1,4%.

Escenarios	Calefacción (KgCO2/m2)	Refrigeración (KgCO2/m2)	ACS (KgCO2/m2)	Iluminación (KgCO2/m2)	Total Operacional (KgCO2/m2)	% Operacional
Escenario 1	239,89	224,9	14,99	524,76	1004,55	
Escenario 2	254,89	219,9	14,99	524,76	1014,54	0,99
Escenario 3	229,9	224,9	14,99	524,76	994,55	-1,00
Escenario 4	254,89	219,9	14,99	524,76	1014,54	0,99
Escenario 5	239,89	224,9	14,99	524,76	1004,55	0,00
Escenario 6	249,89	284,87	14,99	524,76	1074,52	6,97
Escenario 7	249,89	219,9	14,99	524,76	1009,55	0,50

Tabla 3. Emisiones totales en la fase operacional (KgCO2/m2).

Escenario 8	269,88	219,9	14,99	524,76	1029,54	2,49
-------------	--------	-------	-------	--------	---------	------

En la Tabla 5 se observa que las emisiones de CO2 son muy parecidas en todos los escenarios al igual que los valores obtenidos de energía incorporada. Sin embargo, al igual que la energía, el escenario 7 se constituye en el escenario más desfavorable ambientalmente.

Escenarios	Producción (KgCO2/m2)	Construcción (KgCO2/m2)	Desconstrucción (KgCO2/m2)	Total Incorporada (KgCO2/m2)	% Incorporada
Escenario 1	664,68	11,75	7,2	683,63	
Escenario 2	663,19	11,81	7,36	682,35	-0,19
Escenario 3	664,7	11,75	7,2	683,65	0,00
Escenario 4	663,85	11,78	7,2	682,83	-0,12
Escenario 5	660,94	11,69	7,06	679,69	-0,58
Escenario 6	671,25	11,67	6,89	689,81	0,90
Escenario 7	683,6	11,66	6,88	702,14	2,71
Escenario 8	658,34	11,65	6,89	676,88	-0,99

Tabla 5. Emisiones totales en las etapas no operacionales (KgCO2/m2)

Dentro de las fases no operacionales, el edificio con fachadas de paneles de sándwich de poliéster reforzado de fibra de vidrio (escenario 8), es el que emite menos emisiones de CO2 al ambiente, debido al menor consumo de energía incorporada.

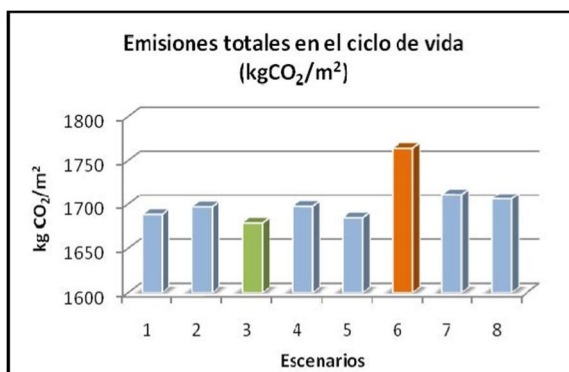
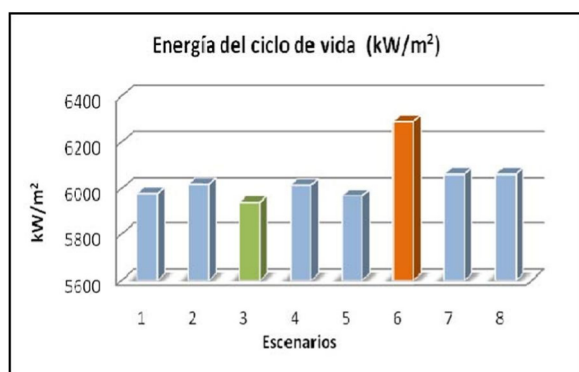
- **Ciclo de vida completo**

En la Tabla 6 y Figuras 4 y 5 se puede ver que el mayor consumo energético en todo el ciclo de vida está determinado por la fase operacional, ya que es la que aporta un mayor porcentaje a la energía total. De este modo se aprecia que el mejor escenario, tanto en consumo de energía como en emisiones, corresponde al escenario 3 y el escenario menos beneficioso desde el punto de vista ambiental, corresponde al escenario 6.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Escenarios	Fases no operacionales		Fase operacional		Ciclo de vida completo	
	Total energía Incorporada (kW/m ²)	Total emisiones (kgCO ₂ /m ²)	Total energía Operacional (kW/m ²)	Total emisiones (kgCO ₂ /m ²)	Total energía (kW/m ²)	Total emisiones (kgCO ₂ /m ²)
Escenario 1	1959,32	683,63	4018,19	1004,55	5977,51	1688,18
Escenario 2	1955,99	682,35	4063,17	1014,54	6019,16	1696,89
Escenario 3	1959,37	683,65	3978,21	994,55	5937,58	1678,2
Escenario 4	1957,21	682,83	4058,17	1014,54	6015,38	1697,37
Escenario 5	1948,12	679,69	4018,19	1004,55	5966,31	1684,24
Escenario 6	1976,26	689,81	4313,06	1074,52	6289,32	1764,33
Escenario 7	2013,82	702,14	4048,18	1009,55	6062	1711,69
Escenario 8	1943,65	676,88	4118,15	1029,54	6061,8	1706,42

Tabla 6. Energía y emisiones del ciclo de vida en todos los escenarios.



Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en el presente estudio se pueden extraer las siguientes conclusiones:

La fase operacional es la responsable del mayor consumo energético y de una mayor emisión de CO₂ al ambiente en todos los escenarios evaluados, por lo tanto es la que más contribuye al fenómeno del cambio climático y es donde se deben centrar los esfuerzos en medidas

Fig. 4. Energía total de los diferentes escenarios

correctoras más eficientes.

Fig. 6. Emisiones totales de los diferentes escenarios

Aunque la energía incorporada constituye el porcentaje menor dentro del ciclo de vida de la energía (33%), ésta juega un papel importante a lo largo del ciclo de vida del edificio de estudio.

Dentro de las fases no operacionales, la etapa de producción /fabricación de materiales es la que más contribuye al fenómeno del cambio climático, ya que es la que presenta el mayor consumo de energía incorporada, por ello es importante dar cada vez un mayor peso al uso de fuentes de energías renovables. El edificio con fachadas de paneles de sándwich metálico, con placa aislante de poliuretano es el que presenta el mayor valor de energía incorporada.

Teniendo en cuenta todo el ciclo de vida del edificio, los mejores escenarios desde un punto medioambiental coinciden con los de la etapa operacional, por presentar una mayor contribución al resultado total de energía. De este modo, tanto en la etapa operacional, como en todo el ciclo de vida, el mejor escenario corresponde al escenario 3 (todas las fachadas con fábrica cerámica revestida, sin cámara de aire y aumento del aislamiento térmico en un 50%) y el más desfavorable ambientalmente por su mayor contribución al cambio climático corresponde al edificio con fachadas de muro cortina.

La aplicación del ACV permite tomar decisiones acerca de los materiales y sistemas constructivos más beneficiosos desde el punto de vista medioambiental, constituyéndose de este modo en una herramienta que ayuda a las empresas constructores a cumplir con su responsabilidad social.

Recomendaciones

Debido al papel que juega la energía incorporada dentro del ciclo de vida de una edificación, se recomienda a los arquitectos y proyectistas, tomar decisiones y medidas adecuadas desde la fase de diseño, con el fin de mejorar la eficiencia energética durante las fases no operacionales, garantizando de este modo un mejor bienestar a la sociedad actual y futura.

De acuerdo con los porcentajes obtenidos de energía incorporada se sugiere incluirla dentro de la valoración final de la eficiencia energética de un edificio y adoptar medidas como la buena gestión de los materiales de final de vida (potencial de reciclaje), la sustitución de materiales o la utilización de materiales locales con el fin de disminuir los impactos derivados del transporte del material.

Se recomienda efectuar un estudio más detallado de cada una de las diferentes alternativas,

con el fin de conocer cuál es la más viable tanto económica, como técnica y medioambientalmente.

BIBLIOGRAFÍA

ARANDA USÓN, Alfonso; ZABALZA BRIBIÁN,

Ignacio; DÍAZ DE GARAIO, Sergio y LLERA

SASTRESA, Eva. *Eficiencia Energética En*

Instalaciones y Equipamiento De Edificios.

Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza, 2010. ISBN 9788492774968 pp. 9-34.

BLENGINI, Gian Andrea; and DI CARLO, Tiziana. The Changing Role of Life Cycle Phases, Subsystems and Materials in the LCA of Low Energy Buildings. *Energy and Buildings*, 6, 2010, vol. 42, no. 6, pp. 869-880.

CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN (CTE) DIRECTIVA 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del consejo de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios.

DIXIT, Manish Kumar, et al. Identification of Parameters for Embodied Energy Measurement: A Literature Review. *Energy and Buildings*, 8, 2010, vol. 42, no. 8, pp. 1238-1247.

JIMÉNEZ CAÑABATE, Juan F. *Comparativa De Eficiencia Energética y Amortización En El Edificio De can Marçet De Sabadell Entre Distintas Instalaciones De Energías Renovables*. Tesis De Máster. Universidad Politécnica De Cataluña. Barcelona. , 2009.

GONZÁLEZ ARMADA, Carlos. *Cambio Climático : Causas, Consecuencias y Soluciones*. Madrid: Amv, 2010. ISBN 9788496709485; 9788484764021, pp 13-23.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (2007). Cambio Climático 2007: Informe de síntesis. Resumen para responsables de políticas.

GÜERECA HERNÁNDEZ, Leonor P. Desarrollo de una metodología para la valoración en el Análisis Del Ciclo De Vida aplicada a la Gestión Integral De Residuos Municipales. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, 2006.

HASTINGS, Robert; and WALL, Maria. *Sustainable Solar Housing*. London: Earthscan, 2007.

HUBERMAN, N.; and PEARLMUTTER, D. A Life-Cycle Energy Analysis of Building Materials in the Negev Desert. *Energy and Buildings*, 2008, vol. 40, no. 5, pp. 837-848. ISSN 0378-7788.

KANG, Kyung Ho; LEE, Seokiand HUH, Chang. Impacts of Positive and Negative Corporate Social Responsibility Activities on Company Performance in the Hospitality Industry. *International Journal of Hospitality Management*, 3, 2010, vol. 29, no. 1, pp. 72-82. ISSN 0278-4319.

MÉNDEZ PICASO, M^a Teresa. Ética y Responsabilidad Social Corporativa. Revista ICE Ética y Economía, 2005, nº 823, pp. 141

150.

MONAHAN, J.; and POWELL, J. C. An Embodied Carbon and Energy Analysis of Modern Methods of Construction in Housing: A Case Study using a Lifecycle Assessment Framework. *Energy and Buildings*, 1, 2011, vol. 43, no. 1, pp. 179-188.

NAVARRO PRADOS, Juan Antonio. Criticism and support to corporate social responsibility: an ethnographic approach based on the workers' experience and a qualitative methodology proposal. *Univ. Psychol.*, Jan.-Apr. 2007, vol.6, no.1, p.59-68. ISSN 1657-9267.

Organización Internacional de Normalización (ISO): Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Principios y marco. ISO 14040:2006.

PACHECO B., Alberto. *Normativa Ambiental Aplicable a Productos De La Construcción. Estado Del Arte*. Tesis De Máster. Universidad Politécnica De Cataluña. Barcelona. , 2009.

PULSELLI, R. M., et al. Energy Analysis of Building Manufacturing, Maintenance and use: Embuilding Indices to Evaluate Housing Sustainability. *Energy and Buildings*, 5, 2007, vol. 39, no. 5, pp. 620-628. ISSN 0378-7788.

RAMESH, T.; PRAKASH, Ravi and SHUKLA, K. K. Life Cycle Energy Analysis of Buildings: An Overview. *Energy and Buildings*, 10, 2010, vol. 42, no. 10, pp. 1592-1600.

REY MARTÍNEZ, Francisco J. y VELASCO GÓMEZ, Eloy. *Eficiencia Energética En Edificios: Certificación y Auditorías Energéticas*. Madrid: Thompson, 2006. ISBN 8497324196, pp 1-7.

VARGAS SANCHEZ, Alfonso; VACA ACOSTA, Rosa María. Responsabilidad Social Corporativa y cooperativismo: vínculo y potencialidades. *Revista de Economía Pública, Social y Cooperativa*, nº 53, noviembre 2005, pp. 241

260.

ZABALZA BRIBIÁN, Ignacio; VALERO CAPILLA, Antonio y ARANDA USÓN, Alfonso. Life Cycle Assessment of Building Materials: Comparative Analysis of Energy and Environmental Impacts and Evaluation of the Eco-Efficiency Improvement Potential. *Building and Environment*, 5, 2011, vol. 46, no. 5, pp. 1133-1140. ISSN 0360-1323.