

# USO COMBINADO DE MÉTODOS DE REDUCCIÓN DE OBJETIVOS Y “MODELOS SUSTITUTOS” PARA ACELERAR LA OPTIMIZACIÓN EN EL DISEÑO DE EDIFICIOS

CARRERAS, Joan <sup>(1)</sup>; POZO, Carlos <sup>(2)</sup>; BOER, Dieter<sup>(1)</sup>; GUILLÉN-GOSÁLBEZ, Gonzalo <sup>(2,3)</sup>; CABALLERO, José Antonio <sup>(4)</sup>; RUIZ-FEMENIA, Rubén <sup>(4)</sup>; JIMÉNEZ, Laureano <sup>(2)</sup>

joan.carreras@urv.cat

(1) Universitat Rovira i Virgili, Departament d'Enginyeria Mecànica, Tarragona (Espanya)

(2) Universitat Rovira i Virgili, Departament d'Enginyeria Química, Tarragona (Espanya)

(3) The University of Manchester, Centre for Process Integration, School of Chemical Engineering and Analytical Science, Manchester (UK)

(4) Universidad de Alicante, Departamento de Ingeniería Química, Alicante (Espanya)

## RESUMEN

El sector de los edificios es responsable de aproximadamente el 40% del consumo total de energía a nivel mundial. Para hacer frente a este problema muchos países de la OECD Europa han dictado medidas destinadas a reducir el consumo de energía en el sector de la edificación. El aislamiento térmico de edificios se presenta como una estrategia prometedora, ya que disminuye la demanda de aire acondicionado y calefacción sin comprometer el confort.

El presente estudio se basa en un modelo de optimización multi-objetivo para minimizar al mismo tiempo los costes y el impacto ambiental de un edificio. Sin pérdida de generalidad, en el presente estudio, los espesores de aislamiento de las superficies exteriores del edificio se toman como las variables a evaluar. El impacto ambiental se cuantificó siguiendo la metodología de análisis del ciclo de vida (ACV), teniendo en cuenta las 10 categorías de puntos intermedios del Eco-Indicador 99 (EI99). La ventaja de trabajar con indicadores intermedios es que cargan con menos incertidumbre que los indicadores agregados finales, sin embargo, los resultados son más complejos de analizar. Para superar el problema de trabajar con muchos objetivos se recurrió a un método riguroso de reducción de objetivos, simplificando el análisis sin cambiar la estructura original del problema.

Los métodos como la optimización o el análisis de sensibilidad pueden resultar poco eficientes para la resolución de problemas que requieren miles o incluso millones de evaluaciones mediante simulación directa. La estrategia usada en el presente estudio para superar esta limitación y acelerar el proceso de optimización es la construcción de modelos de aproximación, conocidos como modelos sustitutos, que imitan el comportamiento del modelo de simulación tan estrechamente como sea posible mientras que los requerimientos computacionales para la optimización pasan a ser mucho menos costosos.

Los resultados muestran que el número de objetivos ambientales se pueden reducir significativamente manteniendo intacta la estructura del problema. Además, se demuestra que la solución del problema, considerando el coste económico y el ampliamente utilizado Eco-Indicador 99 (para la evaluación de impacto ambiental) podría cambiar la estructura original del problema, con la consecuente potencial pérdida de soluciones de Pareto. Por otro lado, mediante los modelos sustitutos el tiempo empleado para el proceso de optimización ha sido drásticamente reducido.

**Palabras clave:** Optimización multi-objetivo, Análisis de Ciclo de Vida, Edificios, Aislamiento

## 1. Introducción

El sector de los edificios es responsable de aproximadamente el 40% del consumo de energía a nivel mundial [1] y responsable de un tercio de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, tanto en los países desarrollados como en los que están en vías de desarrollo [2]. Para hacer frente a este problema muchos países de la OECD han dictado medidas destinadas a reducir el consumo de energía en el sector de los edificios[3]. Para lograr estos objetivos clave hay muchas estrategias energéticas que se pueden aplicar. El aislamiento térmico de edificios se presenta como una estrategia prometedora, ya que disminuye la demanda de aire acondicionado y calefacción sin comprometer el confort dentro del edificio.

Hoy en día la tendencia actual consiste en implementar espesores elevados de aislamiento, ya que más aislamiento supone una reducción del consumo de energía en el edificio. Sin embargo, esta suposición puede conducir a prácticas incorrectas cuando el objetivo es lograr soluciones óptimas económicamente y ambientalmente. Esto es porque el coste y especialmente el impacto ambiental asociado a los materiales de aislamiento pueden ser significativos [4, 5]. Por consiguiente, un problema que se plantea primero como una mera cuestión económica gana complejidad, ya que más perspectivas tienen que ser consideradas.

El método predominante para resolver problemas con más de una función objetivo (por ejemplo, la reducción del coste económico y el impacto ambiental) es, en general, el uso de técnicas de optimización multi-objetivo (OMO) [6–8]. Los principales inconvenientes de esta técnica son i) la generación e interpretación de las soluciones se vuelven complejas cuando se consideran varios objetivos y ii) el coste computacional para la optimización puede ser muy elevado. Para superar estas limitaciones en el presente trabajo se recurre a un riguroso método de reducción de objetivos, lo que simplifica el problema sin cambiar su estructura, y a un modelo sustituto para acelerar el proceso de optimización.

Las capacidades de nuestra metodología se ilustran a través de un caso de estudio basado en una casa tipo cubículo donde los espesores de aislamiento de las superficies exteriores se toman como las variables a estudiar. El objetivo es minimizar al mismo tiempo el coste económico y varios impactos ambientales del cubículo, cuantificados mediante la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV).

## 2. Metodología

### 2.1. Ecuaciones integradas en el software de simulación

El comportamiento energético de los modelos se calculan utilizando EnergyPlus v.8 [9, 10] un programa de simulación energética de edificios. En términos matemáticos, EnergyPlus contiene un sistema de ecuaciones diferenciales parciales (PDE) que describen un conjunto de balances de energía. Este sistema es necesario para calcular el consumo de energía de los cubículos evaluados. En nuestro caso de estudio los modelos se diferencian entre ellos porque presentan diferentes espesores de aislamiento, que son las variables de decisión de nuestro problema. Aunque estas son las variables evaluadas en el estudio, se trata de una metodología general que puede trabajar con diferentes variables de decisión.

### 2.2. Funciones objetivo

#### 2.2.1. Indicadores económicos

Para cuantificar el coste total de las distintas alternativas de diseño de los cubículos se tiene en cuenta el coste del material más el coste de calefacción y aire acondicionado durante la vida útil del edificio. El objetivo es lograr el coste total mínimo. Para lograr el coste mínimo ( $Cost_{total}$ ) tenemos que tener en cuenta el coste de los materiales para la construcción del edificio ( $Cost_{build}$ ) junto con el coste de la

energía consumida durante la fase operativa del edificio ( $Cost_{energy\_n}$ ), la ecuación se presenta a continuación:

$$Cost_{total} = Cost_{build} + Cost_{energy\_n} \quad (1)$$

El coste económico total de los materiales de construcción viene dado por:

$$Cost_{build} = \sum_k P_{Cost_k} \cdot Quant_k \quad (2)$$

Donde  $Cost_{build}$  es el coste total asociado a los materiales de construcción,  $P_{Cost_k}$  es el coste actual por kilogramo de material  $k$  y  $Quant_k$  es la cantidad correspondiente en kilogramos de material  $k$ .

El coste asociado a la energía consumida para cubrir las demandas de calefacción y refrigeración del edificio viene dado por:

$$Cost_{energy\_n} = \sum_n Cons_{energy} \cdot P_{Cost_{energy}} \cdot (1+Inf)^n \quad (3)$$

Donde  $Cost_{energy\_n}$  es el coste de energía a lo largo de  $n$  años,  $Cons_{energy}$  es la energía consumida en kWh para calefacción y aire acondicionado,  $P_{Cost_{energy}}$  es el coste presente del kWh de energía, y  $Inf$  es el incremento anual del coste de energía.

### 2.2.2. Indicadores ambientales

El impacto ambiental causado por la energía consumida y los materiales de construcción se cuantifica mediante la evaluación del análisis de ciclo de vida (ACV), concretamente mediante el Eco-indicador 99 (EI99) [11]. Esta información ha sido extraída de la base de datos EcoInvent [12]. En el presente trabajo vamos a considerar la categoría de “puntos intermedios” ya que carga con menor incertidumbre que los indicadores agregados (estos últimos sufren del proceso de ponderación y normalización cuando son convertidos de puntos intermedios a puntos finales). Concretamente en el análisis se consideraran las 10 categorías de puntos intermedios conjuntamente con el indicador agregado del Eco-indicador 99.

El objetivo para el conjunto de indicadores de impacto ambientales lograr un impacto mínimo. El impacto total por cada categoría de impacto EI99 ( $Imp_{totalN}$ ) incluye el impacto de los materiales para la construcción del edificio ( $Imp_{buildN}$ ) y el impacto de la energía consumida durante la fase operativa ( $Imp_{energyN}$ ):

$$Imp_{totalN} = Imp_{buildN} + Imp_{energyN} \quad (4)$$

La cuantificación del impacto de cada categoría en relación con los materiales de cada modelo de edificio viene dada por:

$$Imp_{buildN} = \sum_k Imp_{kN} \cdot Quant_k \quad (5)$$

Donde  $Imp_{buildN}$  es el impacto total del edificio para la categoría de impacto  $N$  (p. ej. cancerígenos),  $Imp_{kN}$  es el coeficiente de impacto para el indicador de puntos intermedios  $N$  por kilogramo de componente  $k$  (p. ej. hormigón) y  $Quant_k$  es la cantidad correspondiente en kilogramos de componente  $k$ . Para convertir la energía consumida a impacto EI99, se utilizan datos de EcoInvent. La ecuación se presenta a continuación:

$$Imp_{energyN} = Imp_{kWhN} \cdot Quant_{kWh} \quad (6)$$

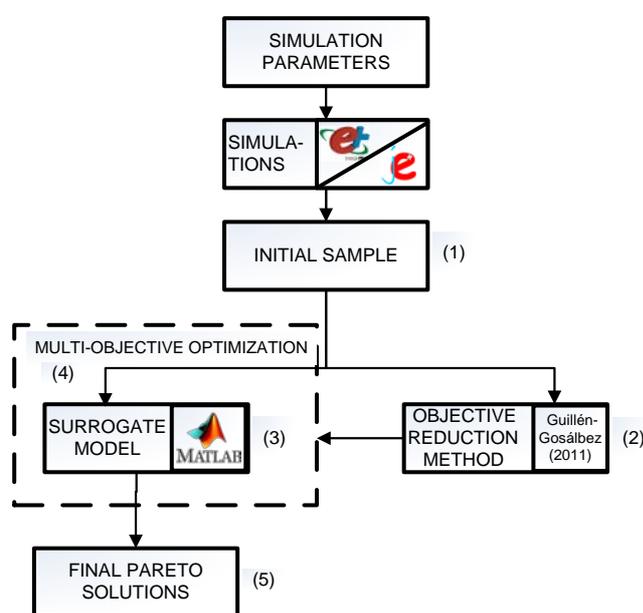
Donde  $Imp_{energy}$  es el impacto total de la energía consumida durante la fase operativa del edificio para la correspondiente categoría de impacto  $N$  (p. ej. cancerígenos),  $Imp_{kWhN}$  es el coeficiente de impacto por cada categoría de impacto  $N$  por kWh de energía en España y  $Quant_{kWh}$  es la energía consumida durante la vida útil del edificio en kWh.

### 2.3. Procedimiento de resolución

La solución del modelo multi-objetivo viene dada por un conjunto de puntos de Pareto [13, 14] que representan el compromiso óptimo entre los objetivos considerados. En nuestro estudio los modelos presentados deben lograr dos objetivos diferentes: mínimo coste y mínimo impacto ambiental.

Cada punto de Pareto se obtiene después de varias simulaciones (iteraciones entre el algoritmo de optimización y el modelo de simulación) lo que conduce a grandes cargas computacionales, más incluso si el número de objetivos evaluados es importante.

Para resolver el problema planteado de forma eficiente seguiremos los siguientes pasos:



- Construiremos una muestra del problema inicial con algunas de las soluciones. (1)

- Aplicaremos el algoritmo de reducción de objetivos propuesto por Guillén-Gosálbez [18] considerando las soluciones de Pareto de la muestra inicial para eliminar los objetivos redundantes sin modificar la estructura del problema. (2)

- Construiremos un modelo sustituto considerando la muestra inicial mediante la metodología de interpolación cubica de Matlab. (3)

- Resolveremos el problema utilizando la técnica de OMO en el dominio reducido i interrogando al modelo sustituto. (4)

- Obtendremos las soluciones óptimas y las analizaremos. (5)

Figura1: Esquema de la estrategia de optimización.

## 3. Caso de estudio

### 3.1. Descripción del modelo

Los cubículos experimentales tienen dimensiones idénticas (cinco paredes planas de 2,4 x 2,4 x 0,15 m). Las paredes están compuestas de 6 capas de material, enumeradas a continuación del exterior al interior: un acabado de mortero de cemento, una estructura de ladrillos huecos, una cámara de aire de 5 cm, una capa de aislamiento de poliuretano, ladrillos perforados y una capa de enlucido de yeso. El techo fue construido con vigas de hormigón y 5 cm de losa de hormigón. Una capa de yeso conforma el acabado interior. El material aislante se coloca sobre el hormigón, protegido con un techo de mortero de cemento con una pendiente del 3% y una doble membrana de asfalto. En el análisis también se considera un cubículo de referencia sin aislamiento.

### 3.2. Especificaciones del modelo

Para la simulación del cubículo, se considera una temperatura de consigna interior de 24 ° C para todo el año [16]. Una bomba de calor con un COP de 3 cubre la demanda de calefacción y refrigeración. No se han integrado en el modelo ni ventanas ni puertas. No se considera ni ventilación natural ni

mecánica pero si una tasa de infiltración fija de 0.12 RAH (renovaciones de aire por hora) [17]. No se considera ninguna carga interna.

Asumimos una vida útil del edificio de 20 años. En referencia al coste económico de los materiales de construcción suponemos que la inversión total se asume el primer año. En cuanto a la electricidad consideramos un precio de 0,16 €/ kWh con un incremento anual del precio del 5%.

## 4. Resultados

### 4.1. Reducción de objetivos

Con el fin de obtener el número mínimo de objetivos con los que predecir el comportamiento ambiental de los cubículos sin cambiar la estructura del problema se recurre al método de k-MOSS, un procedimiento riguroso de reducción de objetivos [18].

Se ha identificado que 9 de los 11 objetivos medioambientales se pueden omitir y al mismo tiempo conservar la estructura del problema, es decir, que solo considerando dos objetivos ambientales y el económico se puede resolver el problema y no perder ninguna solución del espacio de soluciones original (teniendo en cuenta todos los objetivos). Aun así cabe destacar que no sirve cualquier combinación de objetivos. Concretamente las combinaciones de 3 objetivos que permiten mantener la estructura del problema original son dos. En ambas el coste está presente ya que lo imponemos como restricción, el impacto en la salud humana debido a efectos cancerígenos es otro objetivo presente en ambas combinaciones y el tercer objetivo es el impacto en la salud humana debido a la radiación ionizante en una combinación y en la otra el impacto debido al agotamiento de la capa de ozono. En el presente estudio consideramos como tercer objetivo el relacionado con la radiación ionizante.

El estado del arte indica que el enfoque predominante para evaluar el impacto ambiental es recurrir a un indicador agregado. En este punto de la discusión, es necesario analizar si los objetivos considerados en este estudio dan mejores resultados que el uso de un indicador agregado para evaluar el impacto ambiental. Para realizar este análisis vamos a considerar el delta error [15] generado al utilizar el indicador agregado ambiental (EI99) y el coste económico frente al delta error de los dos objetivos ambientales considerados en el presente estudio (cancerígenos y la radiación ionizante) junto con el coste económico. El delta error asociado al considerar los tres indicadores de este estudio es 0. Sin embargo, al evaluar el delta error relacionados con el binomio "EI99 - Coste económico" los cálculos indican un error de 10.64. Incluso teniendo en cuenta, junto con el EI99 y el coste económico, un tercer indicador ambiental un delta error de 0 no se puede alcanzar. La consecuencia final de utilizar el EI99 para evaluar todo el impacto medioambiental es que algunas soluciones óptimas en el espacio original del problema (considerando todos los objetivos) podrían quedar fuera del análisis.

### 4.2. Optimización con un modelo sustituto

En base a un modelo sustituto creado con los outputs obtenidos después de la simulación de una muestra de diseños de cubículo del problema principal se ejecuta la OMO. Con este modelo sustituto el proceso de optimización se acelera debido a que las interrogaciones al programa de simulación se pueden evitar.

El problema de OMO se resuelve utilizando el método de restricción de  $\epsilon$ . El problema requiere resolver  $(E + 1)^{NO}$  modelos. En nuestro problema tenemos 25 parámetros  $\epsilon$  que se aplican para cada objetivo, lo que lleva a 25 NLP (problemas de optimización no lineales). El algoritmo de optimización se puede aplicar al modelo sustituto o al modelo original interrogando el programa de simulación. Utilizando CONOPT, un solver de optimización no lineal (NLP), el problema tarda 2.500 segundos en ser resuelto cuando se interroga al modelo sustituto (más el tiempo requerido para su construcción), mientras que si la optimización se realiza llamando al modelo en EnergyPlus todo el proceso tardaría 106.250 segundos (8 veces más tiempo).

### 4.3. Análisis de la OMO

Tomando como funciones objetivos el impacto ambiental debido a los cancerígenos y el debido a la radiación ionizante junto con el coste económico el análisis de OMO fue desarrollado. La Tabla 7 muestra las 19 soluciones finales de Pareto del problema.

Tabla 7. Soluciones de Pareto del caso de estudio.

Este	Norte	Sur	Oeste	Techo	Coste (€)	Cancerígenos (DALY)	Rad. Ionizante (DALY)
0.21	0.21	0.20	0.21	0.21	4,625.71	$2.76 \cdot 10^{-5}$	$5.24 \cdot 10^{-7}$
0.19	0.20	0.17	0.19	0.20	4,508.18	$2.65 \cdot 10^{-5}$	$5.30 \cdot 10^{-7}$
0.18	0.19	0.11	0.18	0.19	4,426.84	$2.57 \cdot 10^{-5}$	$5.37 \cdot 10^{-7}$
0.17	0.18	0.11	0.17	0.18	4,370.65	$2.52 \cdot 10^{-5}$	$5.42 \cdot 10^{-7}$
0.16	0.17	0.10	0.15	0.18	4,321.85	$2.47 \cdot 10^{-5}$	$5.48 \cdot 10^{-7}$
0.14	0.16	0.10	0.14	0.17	4,279.90	$2.42 \cdot 10^{-5}$	$5.54 \cdot 10^{-7}$
0.13	0.16	0.10	0.13	0.17	4,240.27	$2.38 \cdot 10^{-5}$	$5.61 \cdot 10^{-7}$
0.12	0.15	0.10	0.12	0.17	4,205.76	$2.34 \cdot 10^{-5}$	$5.66 \cdot 10^{-7}$
0.11	0.13	0.09	0.11	0.16	4,174.13	$2.30 \cdot 10^{-5}$	$5.72 \cdot 10^{-7}$
0.11	0.11	0.09	0.11	0.15	4,146.60	$2.27 \cdot 10^{-5}$	$5.79 \cdot 10^{-7}$
0.10	0.11	0.08	0.10	0.14	4,124.10	$2.24 \cdot 10^{-5}$	$5.85 \cdot 10^{-7}$
0.10	0.10	0.08	0.10	0.12	4,105.80	$2.21 \cdot 10^{-5}$	$5.91 \cdot 10^{-7}$
0.09	0.10	0.08	0.09	0.11	4,091.37	$2.19 \cdot 10^{-5}$	$5.97 \cdot 10^{-7}$
0.09	0.09	0.07	0.09	0.10	4,080.66	$2.17 \cdot 10^{-5}$	$6.03 \cdot 10^{-7}$
0.08	0.09	0.07	0.08	0.09	4,068.87	$2.14 \cdot 10^{-5}$	$6.15 \cdot 10^{-7}$
0.08	0.08	0.07	0.08	0.09	4,067.27	$2.13 \cdot 10^{-5}$	$6.21 \cdot 10^{-7}$
0.08	0.08	0.06	0.08	0.08	4,067.47	$2.12 \cdot 10^{-5}$	$6.24 \cdot 10^{-7}$
0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	4,067.30	$2.12 \cdot 10^{-5}$	$6.22 \cdot 10^{-7}$
0.06	0.06	0.04	0.06	0.07	4,123.63	$2.09 \cdot 10^{-5}$	$6.68 \cdot 10^{-7}$

La tabla 8 muestra las diferentes soluciones óptimas extremas para los tres objetivos evaluados y sus mejoras con respecto al caso base (sin aislamiento).

Tabla 8: Comparación de los resultados del caso base y los mejores resultados económicos y ambientales. En la tabla E, N, S, W, R son Este, Norte, Sur, Oeste y techo y los números adjuntos son el espesor del aislamiento en cm (p. ej. E7.6 es 7.6 cm de poliuretano en la pared del este).

Modelo de cubículo	Coste (€)	Cancerígenos (DALYS)	Radiación ionizante (DALYS)	Coste	Mejora(%)		
					Carcino-génicos	Radiación ionizante	
Caso base	Sin aislamiento	5,485.24	2.53E-05	1.08E-06	0	0	0
Coste	E8_N8_S7_W8_R9	4,067.27	2.13E-05	6.21E-07	34.9	18.7	73.5
Cancerígenos	E6_N6_S4_W6_R7	4,123.63	2.09E-05	6.68E-07	33.0	20.9	61.3
Radiación ionizante	E21_N21_S20_W2_I_R21	4,625.71	2.76E-05	5.24E-07	18.6	-8.4	105.6

### 5. Conclusión

En este trabajo se ha presentado una herramienta sistemática para resolver problemas de OMO y obtener diseños óptimos de edificios. Los problemas de OMO presentan dos inconvenientes principales. Por un lado la interpretación de los resultados se vuelve muy compleja cuando

consideran más de tres funciones objetivo. Por otro lado, el proceso de optimización puede ser muy costoso (tiempo), especialmente cuando los modelos simulados son complejos. Para superar estos problemas en el presente estudiorecurrimos a un método de reducción de objetivos que reduce la dimensionalidad del problema manteniendoinalterada su estructura y una técnica de optimización mediante modelos sustituto que proporciona la predicción global de las funciones objetivo y permite acelerar el proceso de optimización.

Aunque la herramienta que presentamos es una metodología general que puede trabajar con cualquier variable de decisión y cualquier función objetivo, en el presente trabajo ilustramos sus capacidades mediante un caso de estudio en el que se considera un edificio de tipo cubículo, los espesores de aislamiento de las superficies externas son las variables evaluadas y los objetivos persiguen minimizar el coste económico y varios impactos ambientales del edificio. Para el análisis económico y ambiental el coste y el impacto de la electricidad consumida para la calefacción y la refrigeración del edificio y el coste e impacto de los materiales de construcción fueron considerados. El impacto ambiental se evaluó mediante la metodología de ACV, considerando específicamente los diez indicadores de puntos intermedios del Eco-Indicador 99 junto con el indicador agregado.

Los resultados muestran que el número de objetivos se puede reducir significativamente manteniendo la estructura del problema. Tres de los 12 indicadores fueron seleccionados para la evaluación de todo el problema, uno de ellos considera el coste total y se incluye directamente en la función objetivo, mientras que los otros dos, los cuales fueron obtenidos después de aplicar el algoritmo de reducción de objetivos, evalúan el impacto ambiental. Además, se ha demostrado que la solución del problema, considerando el coste económico y el ampliamente utilizado indicador agregado del Eco-Indicador 99 (para la evaluación de impacto ambiental) podría cambiar la estructura original del problema, con la consecuencia de perder potenciales soluciones de Pareto del espacio de soluciones original.

Aunque la construcción de un modelo sustituto requiere tiempo, el proceso de optimización se reduce notablemente permitiendo resolver el problema global 8 veces más rápido. Los resultados indican que, para nuestro caso de estudio, se puede llegar a mejoras significativas (35% desde la perspectiva económica, 21% desde el punto de vista del impacto asociado a cancerígenos y 106% desde el punto de vista del impacto asociado a la radiación ionizante) respecto al caso base (cubículo sin aislamiento).

La metodología presentada pretende promover soluciones óptimas económicamente que mejoran la eficiencia energética en los edificios, y que a la vez presenten un mínimo impacto ambiental.

## 6. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer el soporte económico del Ministerio de Economía y Competitividad del gobierno español (DPI2012-37154-C02-02, CTQ2012-37039-C02)

## 7. Referencias

- [1] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Promoting Energy efficiency investments. Case studies in the residential sector.* . 2008.
- [2] LEVINE, M. ÜRGE-VORSATZ, D. BLOK, K. GENG, L. HARVEY, D. LANG, S. LEVERMORE, G. MEHLWANA, A.M. MIRASGEDIS, S. NOVIKOVA, A. RILLING, J. and YOSHINO, H. *Residential and commercial buildings.* En : *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [en línea]. 2007. pp. 387–446. Disponible en: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Residential+and+commercial+buildings#0>
- [3] *European Parliament and Council of the European Union Decision No 406/2009/EC of the European Parliament and of the council of 23 April 2009 on the efforts of member states to reduce their greenhouse gas emissions to meet the community's emission reductio.* Official Journal of the European Union, L140 (2009), pp. 136–148. 2009.

- [4] BLENGINI, G.A. and DI CARLO, T. *The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings*. Energy and Buildings [en línea]. 2010. vol. 42, no. 6, pp. 869–880. [Consulta 9 September 2014]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778810000022>
- [5] STEPHAN, A. CRAWFORD, R.H. and DE MYTTENAERE, K. *A comprehensive assessment of the life cycle energy demand of passive houses*. Applied Energy [en línea]. 2013. vol. 112, pp. 23–34. [Consulta 7 September 2014]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913004996>
- [6] GEBRESLASSIE, B.H. GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G. JIMÉNEZ, L. and BOER, D. *Design of environmentally conscious absorption cooling systems via multi-objective optimization and life cycle assessment*. Applied Energy [en línea]. 2009. vol. 86, no. 9, pp. 1712–1722. [Consulta 7 May 2014]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261908003048>
- [7] GROSSMANN, I.E. and GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G. *Scope for the application of mathematical programming techniques in the synthesis and planning of sustainable processes*. Computers & Chemical Engineering [en línea]. 2010. vol. 34, no. 9, pp. 1365–1376. [Consulta 11 November 2014]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135409002841>
- [8] CARRERAS, J. BOER, D. GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G. CABEZA, L.F. MEDRANO, M. and JIMÉNEZ, L. *Multi-objective optimization of thermal modelled cubicles considering the total cost and life cycle environmental impact*. Energy and Buildings [en línea]. 2014. vol. 88, pp. 335–346. [Consulta 29 December 2014]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814010585>
- [9] *EnergyPlus, Energy Simulation Software - <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/> [Accessed: May 2014]*. [en línea]. 2014. Disponible en: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>
- [10] CRAWLEY, D.B. LAWRIE, L.K. WINKELMANN, F.C. BUHL, W.F. HUANG, Y.J. PEDERSEN, C.O. STRAND, R.K. LIESEN, R.J. FISHER, D.E. WITTE, M.J. and GLAZER, J. *EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program*. Energy and Buildings. 2001. vol. 33, pp. 319–331.
- [11] *PRé Consultants. The Eco-indicator 99A damage oriented method for life cycle impact assessment. Methodology report and manual for designers*. Technical Report, PRé Consultants, Amersfoort, The Netherlands. 2000.
- [12] *The Ecoinvent Center. A competence centre of ETH; PSI; Empa & ART*. [en línea]. Disponible en: <http://www.ecoinvent.ch/>
- [13] BRUNET, R. CORTÉS, D. GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G. JIMÉNEZ, L. and BOER, D. *Minimization of the LCA impact of thermodynamic cycles using a combined simulation-optimization approach*. Applied Thermal Engineering [en línea]. 2012. vol. 48, pp. 367–377. [Consulta 20 January 2014]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111200275X>
- [14] ANTIPOVA, E. BOER, D. CABEZA, L.F. GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G. and JIMÉNEZ, L. *Uncovering relationships between environmental metrics in the multi-objective optimization of energy systems: A case study of a thermal solar Rankine reverse osmosis desalination plant*. Energy [en línea]. 2013. vol. 51, pp. 50–60. [Consulta 9 January 2014]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544213000078>
- [15] GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G. *A novel MILP-based objective reduction method for multi-objective optimization: Application to environmental problems*. Computers & Chemical Engineering [en línea]. 2011. vol. 35, no. 8, pp. 1469–1477. [Consulta 12 October 2014]. Disponible en: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-79960562241&partnerID=tZ0tx3y1>
- [16] CASTELL, A. MENOUIFI, K. DE GRACIA, A. RINCÓN, L. BOER, D. and CABEZA, L.F. *Life Cycle Assessment of alveolar brick construction system incorporating phase change materials (PCMs)*. Applied Energy [en línea]. 2013. vol. 101, pp. 600–608. [Consulta 2 January 2014]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261912005119>
- [17] *Residential Prototype Building Models. U.S. Department of Energy*. [en línea]. 2013. Disponible en: [http://www.energycodes.gov/development/commercial/90.1\\_models](http://www.energycodes.gov/development/commercial/90.1_models)