

APLICACIÓN DE ECO-COST EN EL DISEÑO DE EDIFICIOS

CARRERAS, Joan (1); BOER, Dieter (1); GUILLÉN-GOSÁLBEZ, Gonzalo (2,3); CABEZA, Luisa (4); JIMÉNEZ, Laureano (2)

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) Universitat de Lleida, GREA Innovació Concurrent, Lleida, (Espanya)

RESUMEN

Generalmente, la elección o la elaboración de un producto es una mera cuestión económica. Sin embargo, en las últimas décadas, la sociedad está adquiriendo una mayor concienciación ambiental. Como resultado de esta conciencia sostenible muchas empresas y consumidores persiguen que los productos sean rentables económicamente pero que al mismo tiempo sean respetuosos con el medio ambiente produciendo un bajo impacto ambiental. Normalmente el objetivo económico y el ambiental son opuestos, es decir, para conseguir una mejora en uno necesariamente hay que empeorar el otro.

Para resolver este problema, podemos recurrir a la técnica de optimización multi-objetivo cuyo resultado viene dado por un conjunto de soluciones óptimas, que representan una combinación única de los objetivos económico y ambiental. El problema viene dado por la elección de la solución final, ya que generalmente hay muchos implicados y distintos intereses en el proceso de toma de decisiones. Para superar este problema una estrategia puede ser la de convertir los impactos ambientales a términos de valor monetario estandarizado. De esta manera, se simplifica el proceso de toma de decisiones ya que, por lo general, sólo hay una solución óptima que viene expresada en términos monetarios.

El objetivo del presente estudio consiste en encontrar el espesor óptimo de aislamiento térmico de las superficies exteriores de un edificio que permite minimizar simultáneamente el coste económico y el impacto medioambiental. La evaluación del impacto ambiental se realiza a través de un indicador llamado Eco-cost (basado en ACV) que representa los costes marginales de prevención del impacto potencial de un producto o actividad.

Las capacidades de la metodología se demuestran a través de su aplicación a un caso de estudio donde se considera una construcción tipo localizada en Lleida (Espanya). Los resultados indican que la solución obtenida teniendo en cuenta el coste más el eco-coste (TEC) difiere de la solución que se obtendría considerando únicamente el coste ya que la solución TEC presenta un pequeño aumento económico pero con una importante mejora ambiental.

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

1. Introducción

Actualmente en edificios de nueva construcción la tendencia es implementar grandes grosores de aislamiento para reducir la demanda de refrigeración y sobretodo de calefacción. No obstante desde un punto de vista económico llega un punto en el que mayor grosor de aislamiento no implica una reducción económica cuando se considera también el coste de construcción. Por otro lado, se debería tener en cuenta también el impacto ambiental a la hora de elegir el grosor óptimo de aislamiento.

Normalmente el objetivo económico y el ambiental son opuestos, es decir, para conseguir una mejora en uno necesariamente hay que empeorar el otro. La metodología más utilizada para resolver este tipo de problema consiste en recurrir a la técnica de optimización multi-objetivo cuyo resultado viene dado por un conjunto de soluciones óptimas, que representan una combinación única de los objetivos económico y ambiental. El problema viene dado por la elección de la solución final, ya que en muchos procesos de decisión hay varios agentes implicados cada uno con sus respectivos intereses.

Una de las estrategias para solucionar este problema puede ser la de convertir los impactos ambientales a términos de valor monetario estandarizado. De esta manera, se simplifica el proceso de toma de decisiones ya que, por lo general, sólo hay una solución óptima y además viene expresada en términos monetarios, de manera que resulta mucho más fácil de interpretar.

En el presente trabajo hemos recurrido a la metodología de Eco-cost. Eco-cost es una técnica basada en análisis de ciclo de vida (ACV) y considera todos los costes marginales de prevención relacionados con un producto o actividad. Estos son los costes que deben ser pagados para reducir la contaminación y el agotamiento de materiales del medio ambiente en nuestro mundo a un nivel que esté en consonancia con la capacidad de carga de nuestra tierra [1]. Otros autores anteriormente han utilizado el indicador Eco-cost en diferentes problemas [2–5].

Las capacidades de la metodología se comprobarán a través de su aplicación a un caso de estudio donde se considera una construcción tipo localizada en Lleida (España). Se comparará la solución óptima obtenida teniendo en cuenta la cuestión económica y ambiental (eco-coste) contra la solución que solo considera aspectos económicos.

2. Metodología

2.1. Implementación computacional

La evaluación del consumo energético se ha realizado mediante el software EnergyPlus. La energía consumida durante la vida útil del edificio nos ayuda a evaluar el coste económico operacional y el impacto ambiental. En el presente trabajo se han considerado los datos climáticos de la ciudad de Lleida.

EnergyPlus se ha conectado con una herramienta de optimización que funciona con un algoritmo genético (NSGA-II): JEPlus + EA [6]. Esta herramienta nos permite encontrar la solución óptima dentro del espacio de soluciones del problema, la cual sería muy costosa (a nivel de tiempo) de encontrar con una búsqueda exhaustiva de todas las soluciones posibles.

2.2. Funciones objetivo

2.2.1. Indicadores económicos

En el presente trabajo uno de los objetivos que se persigue es encontrar las soluciones con un mínimo coste económico. Para ello vamos a considerar el coste asociado a la construcción del cubículo y el coste asociado a la electricidad consumida para climatizar el espacio durante la vida útil del edificio.

El coste de los materiales de construcción se ha calculado mediante la siguiente ecuación:

$$Cost_{cub} = \sum_k Price_k \cdot Quant_k \quad (1)$$

Donde $Cost_{cub}$ es el coste total del cubículo, $Price_k$ es el precio por kilogramo de material (los datos se han obtenido en la base de datos de ITeC[7]) y $Quant_k$ es la cantidad correspondiente en kilogramos de material k utilizada en la construcción (p.e. kg de hormigón). El consumo de electricidad se multiplica por el coste de la electricidad en el sector doméstico en España (0,16 €/kWh[8]) considerando una tasa anual de inflación del 5% [9]. La ecuación se presenta a continuación:

$$Cost_{elec_n} = \sum_n Cons_{elec} \cdot PCost_{elec} \cdot (1+Inf)^n \quad (2)$$

Donde $Cost_{elec_n}$ es el coste de la electricidad a lo largo de n años, $Cons_{elec}$ es la electricidad que se consume en calefacción y refrigeración anualmente en kWh, $PCost_{elec}$ es el coste del kWh de electricidad en España e Inf es el incremento anual del coste de la electricidad.

2.2.2. Indicadores ambientales

En el presente estudio vamos a utilizar el indicado reco-cost[10] para evaluar el impacto ambiental. Eco-cost cuantifica la cantidad de carga ambiental de una actividad o un producto en base a la prevención de esa carga. Eco-costos consideran el impacto de los componentes desde la cuna a la tumba, esto incluye desde la extracción de las materias primas hasta su deposición, reutilización o reciclaje incluyendo todas las cargas intermedias relacionadas con el procesamiento, la purificación, el transporte o la distribución de estos productos. Los datos de eco-cost se obtienen de una base de datos desarrollada por la Universidad Tecnológica de Delft. Esta base de datos está basada en el LCI (life cycle impact) de Ecoinvent V3 y se actualizó en 2014. Proporciona el eco-cost de diferentes componentes en €/kgo €/kWh[10].

Desde el punto de vista ambiental, el objetivo es lograr un impacto mínimo. El impacto total (Eco_cost_{total}) comprende el impacto de los materiales de construcción (Eco_cost_{cub}) y el impacto de la electricidad para la calefacción y la refrigeración durante la fase operativa del cubículo (Eco_cost_{elec}):

$$Eco_cost_{total} = Eco_cost_{cub} + Eco_cost_{elec} \quad (3)$$

El eco-cost total de los materiales para la construcción del cubículo se calcula:

$$Eco_cost_{cub} = \sum_k Eco_cost_k \cdot Quant_k \quad (4)$$

Donde, Eco_cost_k es el costo marginal de prevención por kilogramo de material k .

Para traducir la electricidad consumida a eco-cost, se han utilizado los datos del sistema de producción de energía eléctrica de España presentes en la base de datos de Eco-cost. El eco-cost total de la electricidad consumida (Eco_cost_{elec}) se calcula de la siguiente manera:

$$Eco_cost_{elec} = Eco_cost_{kWh} \cdot Quant_{kWh} \quad (5)$$

Donde, Eco_cost_{kWh} es el eco-cost por kWh de electricidad en España y $Quant_{kWh}$ es la electricidad que se consume durante la vida útil del cubículo.

2.2.3. Indicador ambiental y económico

Al transformar el impacto ambiental a términos monetarios convertimos un problema multi-objetivo a un problema con un objetivo único. Con el nuevo escenario, el coste total se calcula de la siguiente manera:

$$TEC = Cost_{conv} + Eco_cost_{total} \quad (6)$$

Donde TEC es el coste total, teniendo en cuenta el coste convencional ($Cost_{conv}$) y el Eco-cost (Eco_cost_{total}). Así, el problema planteado tiene como objetivo minimizar el TEC .

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), pero diferentes materiales (distintos tipos de ladrillos y materiales de aislamiento) con el fin de evaluar su rendimiento. La estructura del cubículo está hecha de cuatro pilares de mortero con barras de refuerzo, uno en cada borde de la celda. La base consiste en una plataforma de hormigón de 3 x 3 m. Las paredes están compuestas de 6 capas de material, enumeradas a continuación de la más externa a la interna: un acabado de mortero de cemento, una estructura de ladrillos huecos, una cámara de aire de 5 cm, una capa de aislamiento, 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. En este caso de estudio se consideran tres materiales de aislamiento: Poliuretano (PU), poliestireno (XPS) y lana mineral (MW).

3.2. Especificaciones del modelo

Para la simulación del cubículo, se considera una temperatura de consigna interior de 24°C para todo el año [11]. 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) [12]. 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 5% de incremento anual del precio.

4. Resultado

4.1. Análisis económico

La figura 1 representa la evolución del coste de la electricidad y el material a medida que aumenta el espesor de aislamiento. El coste del material aumenta a medida que aumenta el espesor de aislamiento mientras que el coste de la electricidad disminuye a medida que aumenta el espesor. La solución óptima de nuestro análisis es la que tiene el coste mínimo teniendo en cuenta los dos términos económicos.

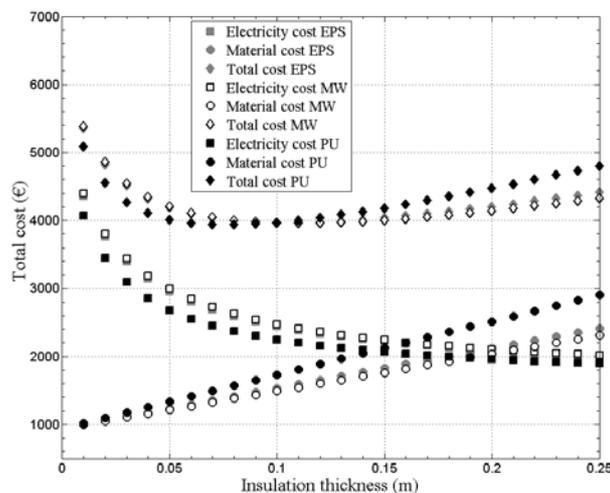


Figura 1: Simulaciones obtenidas a partir de la variación del coste del cubículo con el espesor de aislamiento de PU, MW y EPS.

El poliuretano (PU) resulta ser el material más competitivo desde el punto de vista económico con un espesor de 8 cm. El PU es más caro que los otros materiales de aislamiento, pero su conductividad térmica es menor, por lo que los ahorros de energía que consigue compensan el coste adicional. Como era de esperar la solución con el mejor rendimiento económico no es la que presenta el mínimo coste de la electricidad. No incluir el coste de los materiales en el análisis puede conducir a una solución subóptima. Lo mismo puede decirse para el análisis ambiental.

4.2. Análisis ambiental

La figura 2 muestra que cuando el espesor de aislamiento aumenta el eco-cost de los materiales aumenta linealmente mientras que el eco-cost de la electricidad disminuye. Como en el caso económico, aquí el principal objetivo es lograr la solución con el mínimo eco-cost. La mejor solución ambiental se consigue con la utilización de 20 cm de MW. Esto ocurre porque el impacto ambiental de la MW es mucho más bajo que el impacto de PU y de XPS.

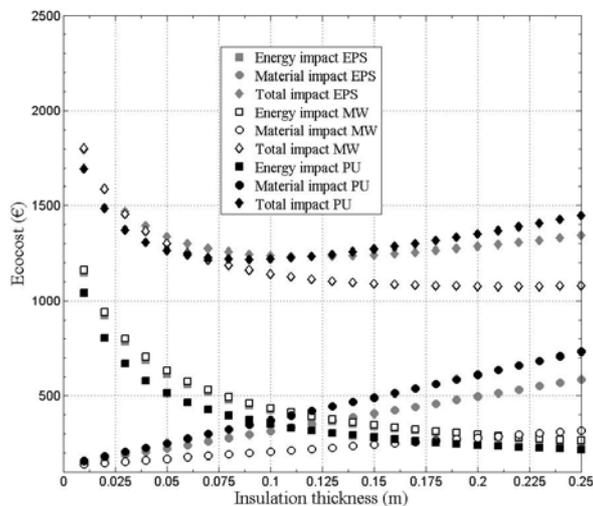


Figura 2: Simulaciones obtenidas a partir de la variación del impacto ambiental del cubículo con el espesor de aislamiento de PU, MW y EPS.

4.3. Análisis económico y ambiental (TEC)

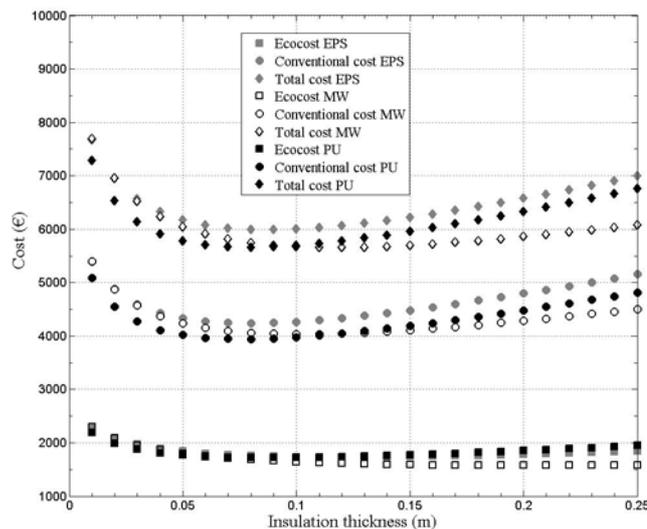


Figura 3: Simulaciones obtenidas a partir de la variación de los costes del cubículo (eco-cost, coste convencional y coste total) con el grosor de aislamiento de PU, MW y EPS.

En esta sección, el coste total, teniendo en cuenta el coste actual y el eco-cost de los materiales y de la electricidad, se analiza. Al convertir el impacto ambiental a términos monetarios, recurriendo al indicador de eco-cost, transformamos un problema multi-objetivo a un problema con objetivos no conflictivos y por lo tanto se alcanza una única solución óptima. La solución óptima se obtiene utilizando MW con un espesor de 12 cm.

Presentación de los mejores resultados económicos, ambientales y totales.

Óptimo económico convencional	8 cm de PU
Óptimo ambiental (eco-cost)	20 cm de MW
Óptimo total (ecocost + coste convencional)	12 cm de MW

En este caso de estudio pasar de la solución de coste económico actual a la solución TCE implica aumentar el espesor del aislamiento y recurrir a un material de menor impacto como es la MW.

4.4. Análisis comparativo de los resultados de TCE y los de OMO (optimización multi-objetivo)

El problema planteado en este trabajo podría formularse como un problema de OMO donde se evalúa por un lado la cuestión económica y por otro la ambiental, sin transformarla a términos económicos. Al convertir el impacto ambiental a términos económicos, utilizando el indicador de eco-cost, estamos pasando de un problema multi-objetivo a un problema con un solo objetivo. Un método no es mejor que el otro, ambos presentan sus ventajas e inconvenientes. La ventaja de Eco-cost es que se expresa en unidades monetarias, no es necesario aplicar ninguna ponderación (todos los puntos medios se expresan en términos monetarios), los cálculos son relativamente claros y transparentes, y se obtiene una única solución óptima, ya que el eco-cost puede incluirse en el coste actual obteniendo una única función objetivo. Sin embargo, el indicador no se centra en el hecho de que las personas deben consumir menos, el método todavía presenta cierta subjetividad debido a que algunos coeficientes poseen incertidumbres al evaluar algunos factores externos, por ejemplo, el agotamiento de materiales como las tierras raras. Si el análisis ambiental se realiza mediante una técnica que no convierte el impacto ambiental a términos monetarios entonces el problema se convierte en multi-objetivo. Utilizando la metodología de ACV mediante indicadores como EI99 o ReCiPe, se está evaluando el impacto ambiental no desde un punto de vista de prevención de este impacto sino desde una perspectiva de compensación. Este procedimiento tiene la ventaja de que hace que la gente sea consciente del hecho de que deben consumir menos, y que las empresas produzcan de forma más limpia. La desventaja es que estos indicadores sufren del proceso de ponderación necesario para convertir los puntos de impacto medio a puntos de impacto final (los puntos medios se expresan en unidades diferentes). Se expresa en "puntos de impacto ambiental" y no en términos monetarios por lo que el problema presenta más de una función objetivo y varias soluciones finales que pueden complicar el proceso de toma de decisiones.

La figura 4 presenta los resultados que se obtienen al realizar el análisis midiendo el impacto ambiental con la técnica de eco-cost (una función objetivo única) y al realizarlo midiendo el impacto con "puntos de impacto ambiental" (problema multi-objetivo). Los ejes x e y se refieren a los resultados del análisis de OMO, cada uno de los diseños de cubículo es uno de los puntos negros de la figura. Por otro lado, el eje y se refiere a los resultados de los TES representados en gris. Cada punto de la figura representa un cubículo con un espesor de aislamiento específico. En el caso de los resultados del análisis OMO, están representadas todas las soluciones óptimas (llamadas soluciones de Pareto). El análisis TCE sólo presenta una única solución óptima (mínimo coste) sin embargo para la comparación la figura presenta las otras soluciones.

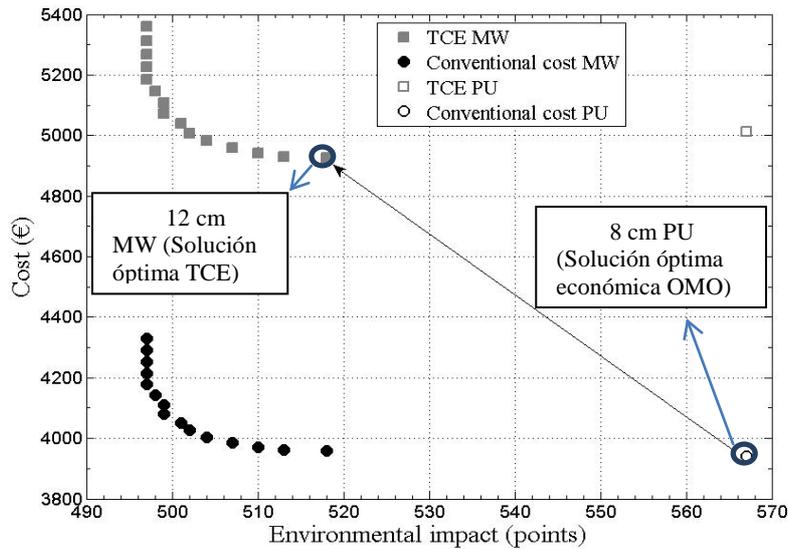


Figura 4: Soluciones óptimas obtenidas a partir de la variación de los costes del cubículo con el impacto del cubículo.

El cubículo con 8 cm de PU es la mejor solución económica en el análisis OMO mientras que para el análisis TCE la solución óptima es de 12 cm de MW. Esto se debe a que cuando se considera el impacto ambiental y se convierte a coste económico, penaliza más el PU que el MW.

5. Conclusiones

En el presente estudio se presenta una metodología para encontrar el diseño óptimo de un edificio con el objetivo de minimizar simultáneamente el coste económico y el impacto ambiental. Para evaluar el impacto ambiental se ha empleado la técnica de eco-cost que le da un valor monetario a cada modelo de edificio que viene dado por el precio que se tendría que pagar para compensar el impacto de este edificio. Este eco-cost se expresa en términos monetarios de manera que se puede sumar al coste convencional consiguiendo transformar un problema multi-objetivo a uno con solo una función objetivo. Esto permite simplificar el proceso de toma de decisiones ya que a diferencia de los problemas multi-objetivo, la solución de este problema viene dada por un único modelo que es el que presenta un menor coste total.

El modelo presentado en el caso de estudio es un edificio tipo cubículo donde la variable evaluada es el tipo y grosor de aislamiento aplicado en las superficies exteriores del edificio. Para cuantificar tanto el coste económico como el impacto ambiental se han considerado los materiales de construcción y la electricidad consumida para climatizar el cubículo durante su vida útil. Los resultados indican que, para el modelo evaluado y considerando las condiciones climáticas de Lleida, la mejor solución desde un punto de vista económico es utilizar 8 cm de poliuretano, en cambio, cuando al coste convencional se le añade el eco-cost el modelo con un mejor desempeño resulta ser el que emplea 12 cm de lana mineral. De esta manera, en este caso de estudio pasar de la solución de coste económico actual a la solución TCE implica aumentar el espesor del aislamiento y recurrir a un material de menor impacto.

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) y del gobierno catalán por la acreditación de calidad de su grupo de investigación GREA (2014 SGR 123). La investigación ha recibido financiación del Séptimo

Programa Marco de la Comisión Europea (FP / 2007-2013) en el acuerdo de subvención no. PIRSES-GA-2013-610692 (INNOSTORAGE).

7. Referencias

- [1] VOGTLÄNDER, J.G. BIJMA, A. and BREZET, H.C. *Communicating the eco-efficiency of products and services by means of the eco-costs/value model*. Journal of Cleaner Production [en línea]. 2002. vol. 10, no. 1, pp. 57–67. [Consulta 13 November 2014]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652601000130>
- [2] BAEZA-BROTOS, F. GARCÉS, P. PAYÁ, J. and SAVAL, J.M. *Portland cement systems with addition of sewage sludge ash. Application in concretes for the manufacture of blocks*. Journal of Cleaner Production [en línea]. 2014. vol. 82, pp. 112–124. [Consulta 13 November 2014]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261400660X>
- [3] KRAVANJA, Z. and ČUČEK, L. *Multi-objective optimisation for generating sustainable solutions considering total effects on the environment*. Applied Energy [en línea]. 2013. vol. 101, pp. 67–80. [Consulta 13 November 2014]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191200311X>
- [4] MORALES-MORA, M.A. ROSA-DOMINGUEZ, E. SUPPEN-REYNAGA, N. and MARTINEZ-DELGADILLO, S.A. *Environmental and eco-costs life cycle assessment of an acrylonitrile process by capacity enlargement in Mexico*. Process Safety and Environmental Protection [en línea]. 2012. vol. 90, no. 1, pp. 27–37. [Consulta 13 November 2014]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582011001066>
- [5] VOGTLÄNDER, J. VAN DER LUGT, P. and BREZET, H. *The sustainability of bamboo products for local and Western European applications. LCAs and land-use*. Journal of Cleaner Production [en línea]. 2010. vol. 18, no. 13, pp. 1260–1269. [Consulta 12 November 2014]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652610001666>
- [6] *JEPlus+EA, an EnergyPlus simulation manager for optimization studies*-<http://www.jeplus.org/> [Accessed: May 2014]. [en línea]. 2014. Disponible en: <http://www.jeplus.org/>
- [7] *BEDEC Database* - <http://www.itec.es/nouBedec.e/bedec.aspx> [Accessed: May 2014]. . 2011.
- [8] GOBIERNO ESPAÑOL. *Boletín Oficial del Estado, Núm. 185, Sec. I. Pág. 56729, Orden IET/1491/2013, de 1 de agosto 2013 España*. . 2013.
- [9] KAYNAKLI, O. *A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews [en línea]. 2012. vol. 16, no. 1, pp. 415–425. [Consulta 20 January 2014]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111004163>
- [10] *Vogtländer J.G., Delft University of Technology*. <www.ecocostsvalue.com> [Accessed: September 2014]. .
- [11] 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>
- [12] *Residential Prototype Building Models*. U.S. Department of Energy. [en línea]. 2013. Disponible en: http://www.energycodes.gov/development/commercial/90.1_models