



**NZEB. Optimización mediante co-simulación. Estudio
de caso (e)Co, prototipo del concurso
Solar Decathlon 2012**

Autor: Antoni Fonseca Casas

Institución: Summ Lab (UPC)

Otros autores: Pau Fonseca (InLab - UPC), Màxim Colls (InLab - UPC)

Resumen

Actualmente, en los estudios de arquitectura, hay una necesidad de integrar diferentes disciplinas y técnicos especializados en el grupo de trabajo; donde se hace imprescindible el uso de simuladores y software CAD (Computer Aided Design) para optimizar el proyecto en fase de diseño a nivel energético y ambiental. Normalmente, los arquitectos e ingenieros gastan mucho tiempo y recursos en levantar el modelo en formato BIM (Building Information Modeling) para ser después analizado en motores de cálculo como EnergyPlus o Doe-2; simplemente llegando a realizar unos cuantos experimentos concretos del modelo de estudio; dejando sin analizar muchas otras posibilidades y sin llegar a optimizarlo ni obtener la mejor configuración del proyecto; de tal manera que, por falta de tiempo, solamente se analiza y se hace un estudio parcial, y muchas veces insuficiente, para saber si la configuración escogida ha sido la más eficiente a nivel energético y económico. La presente publicación muestra las posibilidades de la co-simulación, la cual da respuesta a las dos cuestiones planteadas anteriormente: Para implementar el modelo de co-simulación se utiliza el lenguaje Specification and Description Language (SDL), lenguaje formal gráfico que permite fácilmente integrar y combinarse con otros lenguajes, solucionando la problemática de la integración de diferentes áreas de especialidad. De tal manera que, el SDL, por un lado, es capaz de definir los diferentes modelos gracias a un sistema de diagramas, mucho más ágil y fácil de ser legible que otros lenguajes de programación y capaz de ser entendido fácilmente por todos los integrantes del equipo, arquitectos e ingenieros en un conjunto; y por el otro, nos permite tener definido un modelo capaz de integrar nuevos procesos de cálculo y combinarse con otros simuladores de forma directa. En respuesta al segundo punto, el co-simulador utiliza diferentes motores de cálculo para realizar la optimización del sistema, de forma autónoma y sin tener que entrar y detallar cada experimento concretamente. El co-simulador, mediante la base de datos integrada, optimiza el modelo en base a diferentes soluciones constructivas (pudiendo determinar nuevas configuraciones), orientaciones, zonas climáticas, sistemas de climatización activos y formas geométricas. Es capaz de combinar todas las situaciones deseadas para cada experimento encontrando la solución óptima del conjunto. El co-simulador vía cloud, integrado en página web para el usuario, ha sido utilizado para optimizar, a nivel de demanda energética (optimización mediante diferentes soluciones constructivas), el proyecto (e)CO, prototipo del concurso Solar Decathlon del 2012, como ejemplo de edificación sostenible del grupo de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Vallés (ETSAV – UPC). El objetivo del estudio es proponer un nuevo sistema de co-simulación que resuelve las problemáticas planteadas anteriormente, abriendo nuevos campos y mejorando en gran medida las posibilidades de estudio en la fase de proyecto para atender en la totalidad la complejidad de un sistema arquitectónico. El co-simulador es un proyecto de investigación de al UPC, que está en desarrollo continuo integrando nuevas funcionalidades y más potencia de cálculo, con la intención de abrirse a muchos otros campos tecnológicos. El informe final del caso de estudio, revela la gran utilidad del software y el enorme potencial que posee para ser aplicado en multitud de casos. Gracias a la potencia de cálculo y después de simular más de 4000 situaciones, se ha podido determinar, con exactitud, la configuración idónea para el caso concreto del proyecto (e)CO.

Palabras claves: Eficiencia energética, arquitectura sostenible, co-simulación energética y ambiental, optimización, simulación

1. INTRODUCCIÓN

En respuesta a la nueva directiva europea 2010/31/CE [1] relativa a la eficiencia energética de los edificios y de los datos publicados por la Agencia Internacional de la Energía [2], que prevé un aumento del consumo de más del 40% en los próximos dos decenios, se propone, para el desarrollo de un edificio de cero energía neta (NZEB), el uso de un simulador que aborda el problema de forma integral, desde el diseño conceptual inicial del edificio hasta su demolición. Durante el proceso, se tendrá en cuenta la optimización de los costes de energía e impactos ambientales (energía, CO₂, NO_x ...) y el impacto económico y social. Podemos analizar el modelo del año tras año y ver cómo cambia con el tiempo. Esto hace que sea posible introducir cambios en el modelo ambiental (datos sobre el clima, el entorno construido, los datos de base del modelo...).

En este trabajo, nos centramos en el modelo de simulación en relación con la vida útil del edificio, lo que facilita el desarrollo de escenarios múltiples automáticamente para determinar una solución factible. Para cada escenario, se determina una tipología basada en la forma de la envolvente, la zona climática y altitud, y el mejor aislamiento para uso en respuesta a la necesidad de que la demanda de energía mínimo, el mínimo coste y producción mínima de CO₂ (teniendo en cuenta los materiales utilizados). Esto hace que sea posible obtener un nivel óptimo de aislamiento para un edificio específico en aras de minimizar la demanda de energía.

En este sentido, el simulador da respuesta a la necesidad de integrar diferentes disciplinas y técnicos especializados en el grupo de trabajo; donde se hace imprescindible el uso de simuladores y software CAD (Computer Aided Design) para optimizar el proyecto, en fase de diseño, a nivel energético y ambiental.

Por otro lado, normalmente, los arquitectos e ingenieros gastan mucho tiempo y recursos en levantar el modelo en formato BIM (Building Information Modeling) para ser después analizado en motores de cálculo como EnergyPlus [3] o Doe-2 [4]; simplemente llegando a realizar unos cuantos experimentos concretos del modelo de estudio; dejando sin analizar muchas otras posibilidades y sin llegar a optimizarlo ni obtener la mejor configuración del proyecto (o una configuración que se acerque a ese óptimo); de tal manera que, por falta de tiempo, solamente se analiza y se hace un estudio parcial, y muchas veces insuficiente, para saber si la configuración escogida ha sido la más adecuada. El simulador, alojado en un entorno web, nos permite analizar todos los experimentos necesarios para llegar a encontrar la configuración óptima.

2. ESTADO DEL ARTE

Tradicionalmente, en una NZEB, es un edificio aislado que no está conectado a la red. Es un edificio independiente que no depende de los recursos que no son exclusivamente propios. Sin embargo, es necesario tener en cuenta los materiales utilizados, el proceso de construcción, demolición y la reutilización de estos recursos una vez que han completado su vida útil.

Hoy en día, cada edificio está conectado a las redes de energía y sociales, lo que ha cambiado las reglas del juego. Ahora tenemos que abordar estos conceptos para completar el ciclo (una idea que ya se presentó en Cradle to Cradle [5], que defiende que nos enfrentamos a un nuevo paradigma de diseño).

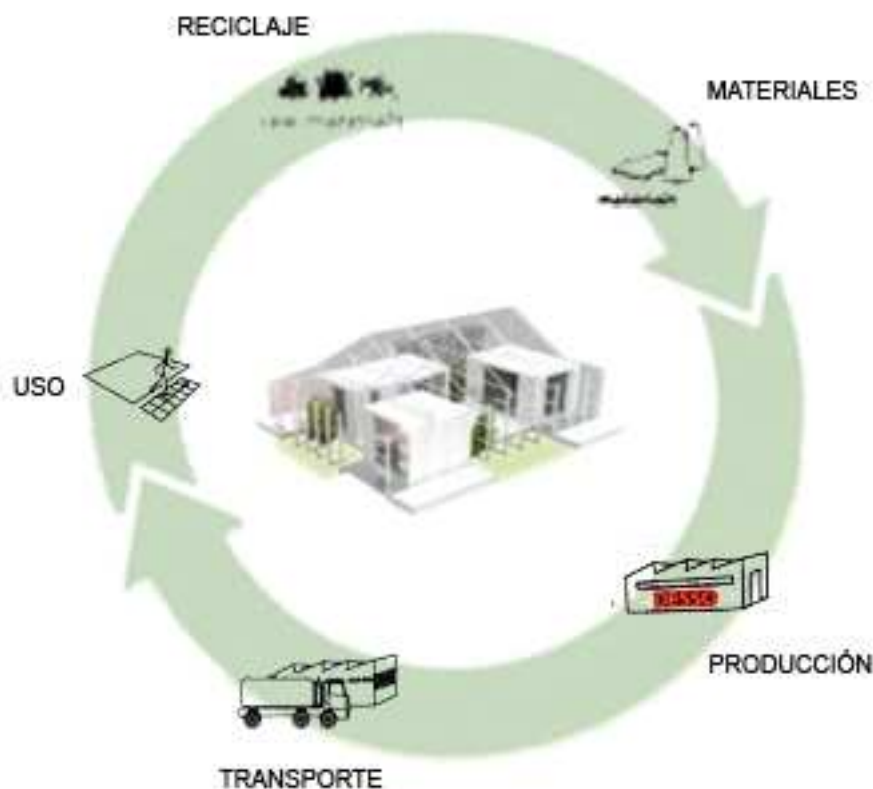


Fig. 1: Cradle to Cradle cycle. Fuente: elaboración propia.

Al examinar el rendimiento energético del edificio utilizando numerosos recursos para el modelado del prototipo. El diseñador pasa mucho tiempo diseñando el modelo virtual. Sólo después de estudiar varias iteraciones del diseño, se puede identificar una buena solución. Sin entrar a analizar todas las posibilidades, el diseñador no puede garantizar que la solución adoptada sea la mejor, o por lo menos una de las mejores soluciones. La mayoría de paquetes de simulación de software comercial nos permiten calcular el análisis anual de energía del edificio, pero no optimizar el proceso. Ni los resultados ni los pasos anteriores, tales como el diseño, la construcción o procesos finales de demolición, se han optimizado.

En la actualidad, se han hecho esfuerzos para desarrollar enfoques y métodos para la evaluación de edificios [6], los métodos para integrar la luz del día y el rendimiento térmico [7] o sistemas de optimización multiobjetivo para el diseño urbano [8] que toman los diferentes aspectos en cuenta cuando se crea un sistema de optimización de energía. Actualmente encontramos algunas herramientas que abordan el problema de optimización planteado anteriormente, tales como GenOpt [9], un programa de optimización para minimizar una función de coste que es evaluado por un programa de simulación externa, o OptEPlus [10], una aplicación enfocada en el sector terciario. En línea con estas aplicaciones, BEopt [11] utiliza una técnica de búsqueda secuencial para automatizar el proceso de identificación de un diseño óptimo en cuanto al uso de energía, y Dakota [12], kit de diseño de análisis para la optimización y aplicaciones TeraScale, es un conjunto de herramientas que tiene por objeto para llevar a cabo una optimización del diseño en un multinivel C++ orientado a objetos marco.

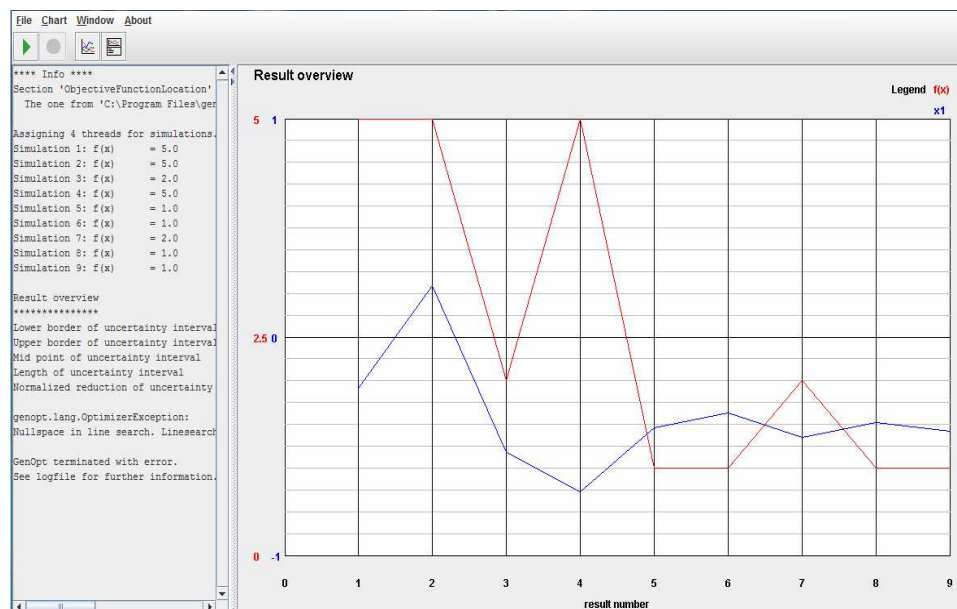


Fig. 2: Image simulation program GenOpt.

Los idiomas de uso común para los simuladores de programación o herramientas de optimización son Java, Fortran, C++ y Delphi, entre otros. Esto puede causar problemas de definición del modelo de integración, y la comprensión entre los investigadores que provienen de distintas disciplinas. Una de las propuestas de este trabajo es el uso de un lenguaje formal para simplificar la definición del modelo y su uso.

Usando lenguajes formales, como Discrete Event System (DEVS) [13], Specification and Description Language (SDL) [14] o Redes de Petri [15], es sin duda la mejor solución para integrar y comunicar fácilmente las ideas sobre el modelo con los demás miembros del equipo, mejorar la interoperabilidad con otros modelos (Co-simulación), fomentar la colaboración y simplificar el proceso de implementación. Como ejemplo de un reciente trabajo que explora el uso de los lenguajes oficiales en la materia, podemos citar Integrating Building Information Modeling & Cell-DEVS Simulation [16].

3. METODOLOGÍA

En este trabajo se utiliza SDL como formalismo para definir el comportamiento del modelo y estructura. SDL [17] tiene una representación visual fácil de entender. Se pueden detallar los procesos y procedimientos que definen el comportamiento del modelo, que permite a ingenieros, arquitectos e investigadores integrar y entender los modelos fácilmente sin necesidad de aprender un lenguaje específico de programación.

Obviamente definir el modelo no es suficiente, es necesario realizar cálculos complejos. Para ello, se identificaron diferentes motores de cálculo que permitan analizar el edificio desde un punto de vista energético [18], como DOE-2.1, BLAST [19], TRNSYS [20], ESP-r [21] y IES<VE> [22]. El uso de EnergyPlus con el DOE-2.1 y el motor de cálculo BLAST (una combinación que ha pasado la prueba de Capacidades de Simulación Energética BESTEST [23]) nos da el poder de computación para analizar los factores que influyen en la energía requerida por un edificio. Por lo tanto, el DOE-2.1 se ha convertido en uno de los motores de cálculo más utilizados y reconocidos internacionalmente y ha sido adoptado como el motor de base de muchas interfaces de software Equest [24] o DesignBuilder [25].

3.1 Specification and Description Language

El uso del lenguaje SDL nos da la máxima flexibilidad para integrar nuevos procesos y procedimientos en el sistema. El uso de un lenguaje formal es una ventaja para la programación al permitir que los técnicos no especializados puedan acceder a la programación para diseñar sus propios modelos e integrarlos directamente en el simulador fácilmente. Además, la explicación del propio modelo es más intuitiva, sencilla y directa que usar un lenguaje de programación como por ejemplo C. El modelo de programación es visible para el grupo, por lo que será mucho más fácil de comprender (validar) y detectar errores (verificar).

SDL lenguaje es un lenguaje formal orientado a objetos definidos por el Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-T) (el Comité Consultatif International de Télégraphie y Telefonía), es por tanto un estándar. El lenguaje fue diseñado para la especificación de los sistemas complejos orientados a eventos, en tiempo real e interactivo. Estos sistemas pueden implicar diferentes actividades concurrentes que utilizan señales para comunicarse. SDL se basa en la definición de los cuatro niveles para describir la estructura y el comportamiento de los modelos: sistema, los bloques, procesos y procedimientos. En SDL, bloques y procesos se denominan agentes. El bloque más exterior, el bloque de sistema, es un agente en sí mismo. Podemos ver esta jerarquía de niveles en la siguiente figura.

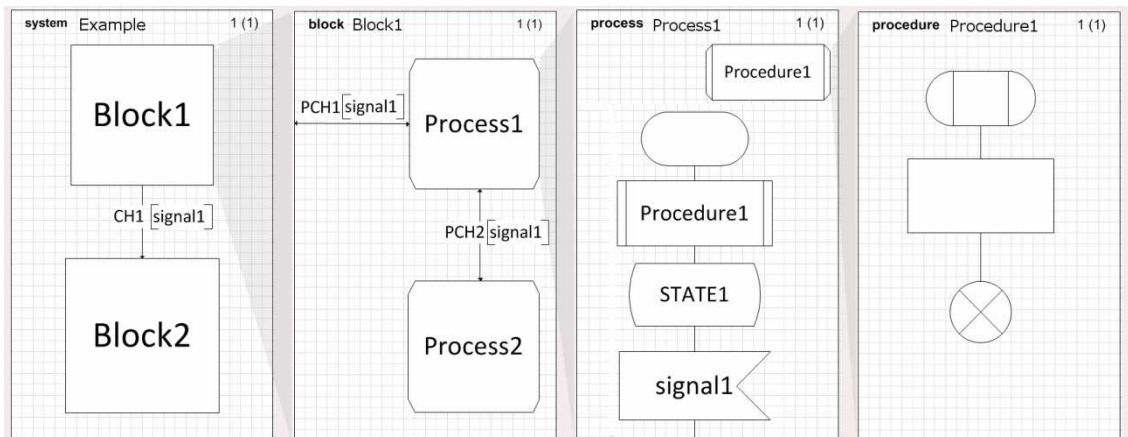


Fig. 3: A structural vision of an SDL model. Four different levels exist.

Los diferentes conceptos del lenguaje SDL son los siguientes:

- **Estructura del sistema:** a partir de los bloques de los procesos y su jerarquía correspondiente.
- **Comunicación:** señales, los caminos de comunicación o canales, parámetros que pueden ser llevadas a cabo por las señales, etc
- **Comportamiento:** definido por diferentes procesos.
- **Datos:** basado en tipos de datos abstractos (ADT).
- **Herencia:** útil para describir las relaciones entre los objetos y sus propiedades.

Aunque existe una representación textual de SDL (SDL / PR), en este trabajo se utiliza la representación gráfica del lenguaje (llamado SDL / GR). Más detalles acerca de la especificación y lenguaje de descripción se pueden encontrar en la Recomendación Z.100 [14] o en el sitio web [26].

3.2 Estructura del modelo

El modelo se estructura en 4 fases principales:

- Proceso de medioambiente
- Proceso de optimización del modelo
- Proceso de Reciclaje
- Proceso de Compensación energética

En esta publicación nos centramos para realizar el estudio de caso en el proceso de optimización del modelo, concretamente en la fase que servirá para optimizar el ahorro energético en el uso del edificio.

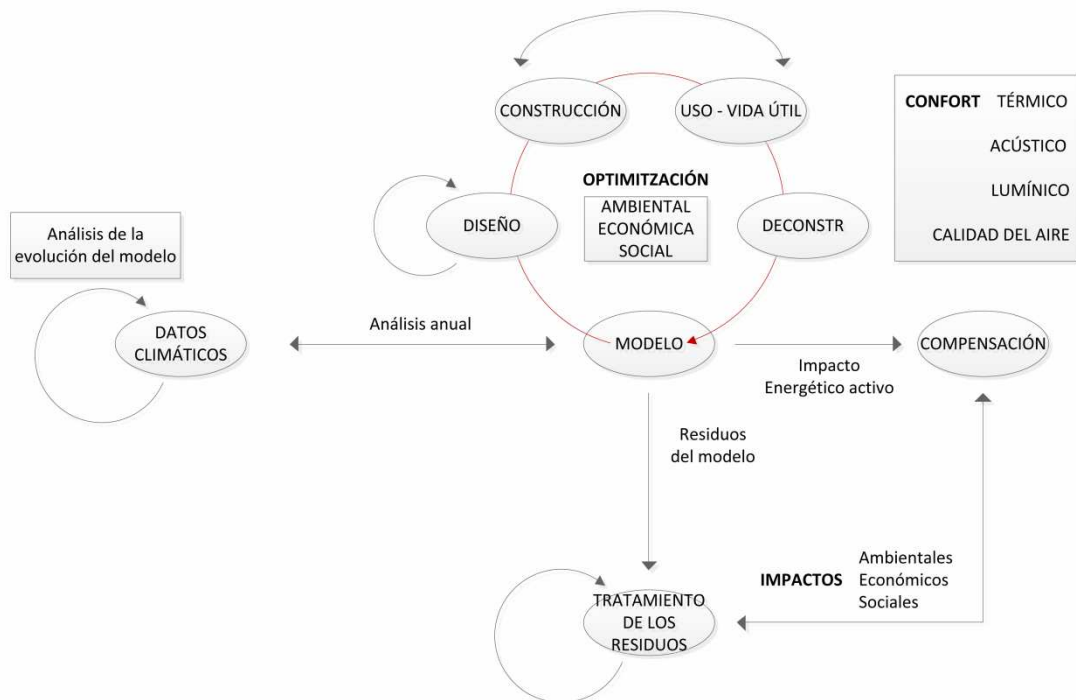


Fig. 4: Visión general de los cuatro procesos del simulador

3.3 Proceso optimización del modelo (proceso principal).

Este proceso consta de:

- FASE 1: Optimización del diseño del modelo.
- FASE 2: Optimización del proceso de construcción (evaluación de los materiales y sistemas constructivos utilizados).
- FASE 3: Optimización del uso y mantenimiento.
- FASE 4: Optimización en el proceso de deconstrucción del modelo.

3.4 Simulador

El simulador combina la potencia de cálculo del EnergyPlus con una base de datos que contiene las características de los materiales y sistemas constructivos utilizados en los modelos de estudio, es decir:

- Propiedades Físicas
- Características e impactos ambientales asociados (Co2, NOx...). Coste de producción, transporte, mantenimiento y de tratamiento de residuos.
- Características e impactos económicos asociados

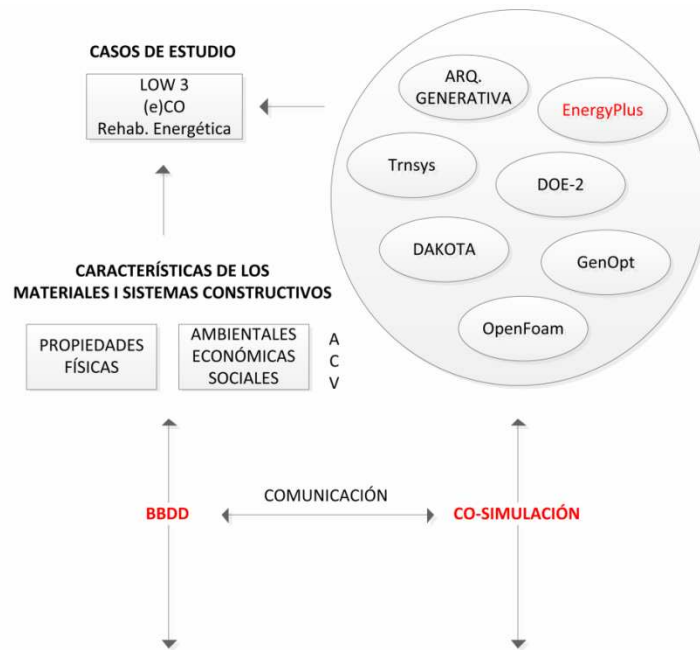


Fig. 5: Relación de la base de datos con el simulador.

Una de las principales ventajas del simulador, es que está alojado en un entorno web, de tal manera, que el usuario puede subir el modelo de estudio a un entorno *cloud* y realizar las diversas simulaciones sin tener que consumir recursos en la computadora local (así se libera de los procesos de cálculo que pueden llegar a ser costosos, permitiéndole al usuario avanzar en otros estudios).



Fig. 6. Portada principal del simulador web.

4. ESTUDIO DE CASO – (E)CO PROJECT – SOLAR DECATHLON 2012

El proyecto (e)CO [27] es un prototipo de vivienda autosuficiente diseñada por la Escuela Superior de Arquitectura del Vallès de la Universidad Politécnica de Cataluña (ETSAV - UPC) que se ha presentado en el último certamen de la prestigiosa competición Solar Decathlon Europe, Madrid 2012. Ha sido desarrollado por los alumnos en colaboración con grupos de investigación interdisciplinarios, empresas privadas, organismos de la administración pública y otros organismos.

Se basa en la amplia experiencia adquirida en el anterior concurso-Solar Decathlon Europe 2010 - en la que el proyecto LOW3 [28] (de bajo impacto, baja energía, bajo costo) presentado por el mismo grupo de investigación, (e)CO, ganó el 1er premio de Arquitectura.

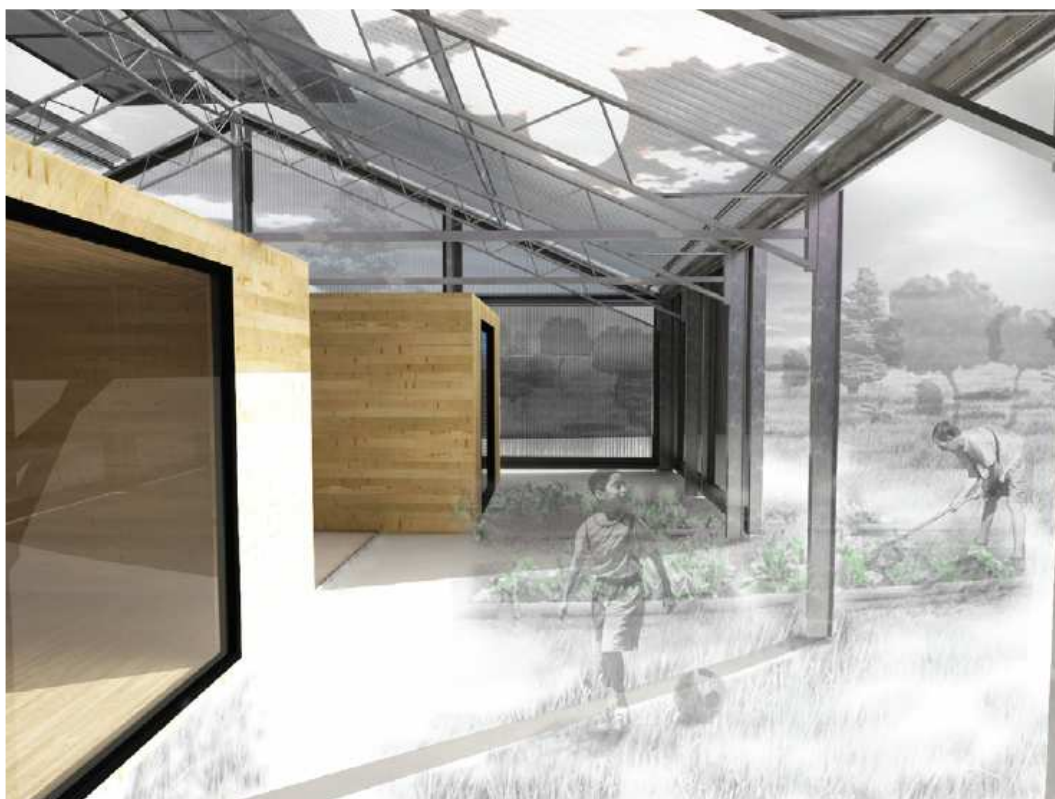


Fig. 7. ECO 2012 solar decathlon building, vista lateral.

Las palabras "(e) + co" juntas abarcan el contexto social actual. La (e) o "Erroba" reinterpreta el símbolo de nuestra década. Simboliza el equilibrio entre los sistemas y la autosuficiencia. "Co-" consiste en colocar juntos, la incorporación de nuevas áreas de investigación y desarrollo y la difusión basada en la cooperación. Como resultado, el término "(e) CO" está destinado a describir un método alternativo para relacionar a la tecnología, los recursos y usuarios en la búsqueda de soluciones de bajo impacto ambiental en el ámbito de la arquitectura sostenible.



Fig. 8. (e)CO 2012 Solar Decathlon building, entrada.

El objetivo es desarrollar un modelo de vivienda autosuficiente basada en los principios de cero huellas económicos y ecológicos. El mecanismo para lograr este objetivo de cero huella es ofrecer más eficiencia, más prestaciones y más confort con menos material, menos energía y menos dinero mediante el diseño de una casa en la que la organización de los sistemas del edificio está en consonancia con el ciclo de la vida.



Fig. 9. (e)CO 2012 Solar Decathlon building, interior.

4.1 Experimento

Para realizar el experimento, las principales variables utilizadas son:

4.1.1 Variables de entrada

*. EPW (archivo clima). Zona climática del concurso es Madrid. Zona final del proyecto será Barcelona (zona climática de simulación final)

Este archivo contiene la descripción del clima que afecta el edificio. Se utiliza el archivo de la base de datos procedentes del IWEC (International Weather for Energy Calculation)

*. idf archivo (archivo de modelo que es entendido por el simulador).

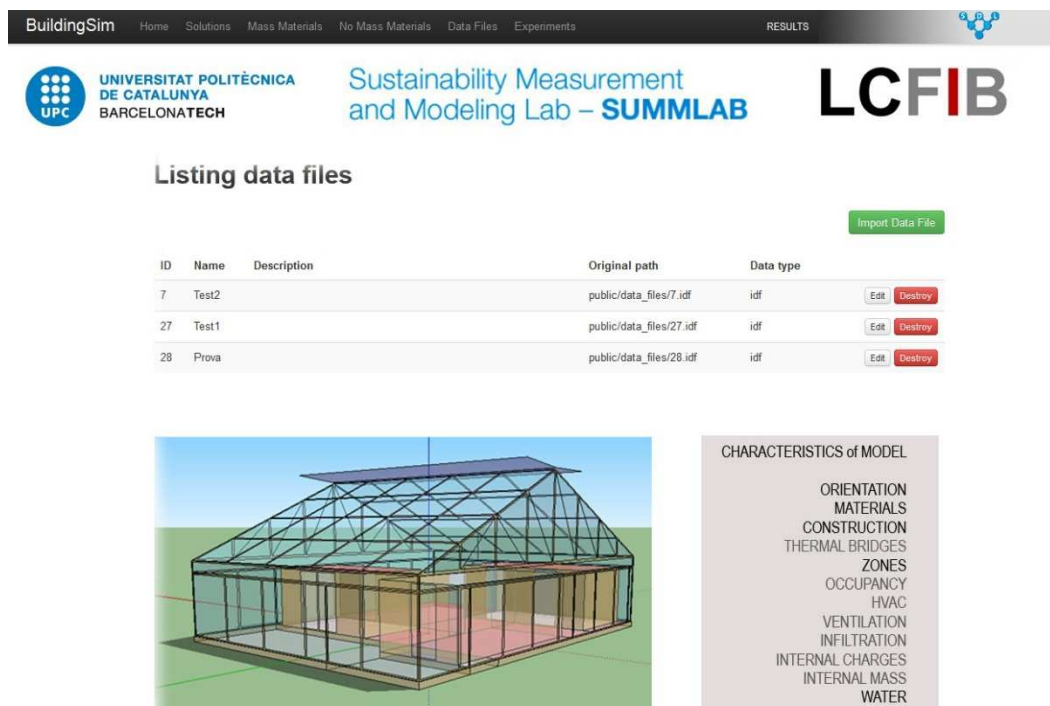
Este archivo contiene la estructura del edificio (geometría, materiales, etc.)

4.1.2 Variables de salida

Se determinará ala **pared más influyente** del modelo para minimizar la demanda energética del edificio.

Se analizará el **impacto ambiental** a nivel de CO2 en relación a los materiales utilizados de acuerdo con el ACV (Análisis del Ciclo de Vida).

Así mismo también se analizará el **impacto económico**.



The screenshot shows the BuildingSim software interface. At the top, there is a navigation bar with 'BuildingSim' and 'RESULTS'. Below the navigation bar, there are logos for 'UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH', 'Sustainability Measurement and Modeling Lab - SUMMLAB', and 'LCFIB'. The main content area is titled 'Listing data files' and contains a table with the following data:

ID	Name	Description	Original path	Data type	
7	Test2		public/data_files/7.idf	idf	Edit Destroy
27	Test1		public/data_files/27.idf	idf	Edit Destroy
28	Prova		public/data_files/28.idf	idf	Edit Destroy

Below the table, there is a 3D model of a building with a glass facade and a gabled roof. To the right of the model, there is a list of model characteristics:

- CHARACTERISTICS of MODEL
- ORIENTATION
- MATERIALS
- CONSTRUCTION
- THERMAL BRIDGES
- ZONES
- OCCUPANCY
- HVAC
- VENTILATION
- INFILTRATION
- INTERNAL CHARGES
- INTERNAL MASS
- WATER

Fig. 10. Proyecto (e)CO 2012, introducido en el simulador.

La variable experimental que se tiene en cuenta en esta simulación del prototipo (e)CO es el espesor del aislamiento. Para llevar a cabo el experimento, se define un experimento 2^k factorial. El valor de respuesta es la demanda de energía, y el objetivo será reducir al mínimo este valor. Los factores que se modifican son los diferentes espesores del aislante de las paredes del edificio.

La estructura del diseño experimental se resume en la tabla siguiente. El valor inicial es de 0.212, y el nuevo valor (mejor aislamiento) es 0.174.

Tabla 1. Estructura del diseño de experimentos.

U (W/m ² K)	North MODULE				South MODULE			
	North Wall	West Wall	South Wall	East Wall	North Wall	West Wall	South Wall	East Wall
s1	0,212	0,212	0,212	0,212	0,212	0,212	0,212	0,212
s2	0,212	0,212	0,212	0,212	0,212	0,212	0,212	0,212
s3	0,212	0,212	0,212	0,212	0,212	0,212	0,212	0,212
s4	0,212	0,212	0,212	0,212	0,212	0,212	0,212	0,212
...
S4096	0,174	0,174	0,174	0,174	0,174	0,174	0,174	0,174

El simulador ayuda a facilitar la aplicación de los escenarios distribuidos.

En nuestro enfoque, dividimos todos los experimentos en diferentes submodelos que se pueden ejecutar en diferentes máquinas, para agilizar el proceso de cálculo.

Cada una de estas máquinas está conectada a un servidor principal que recibe toda la información de todos los motores. La instrucción que permite recibir esta información es el llamado procedimiento de informes.

4.2 Resultados

El problema principal de este modelo es la cantidad de datos se obtiene desde el simulador. Para analizar todos estos datos, y dado que se escogió un diseño factorial 2^k , se utiliza el algoritmo de Yates [29] para detectar las interacciones de los diferentes factores y los principales factores del modelo.

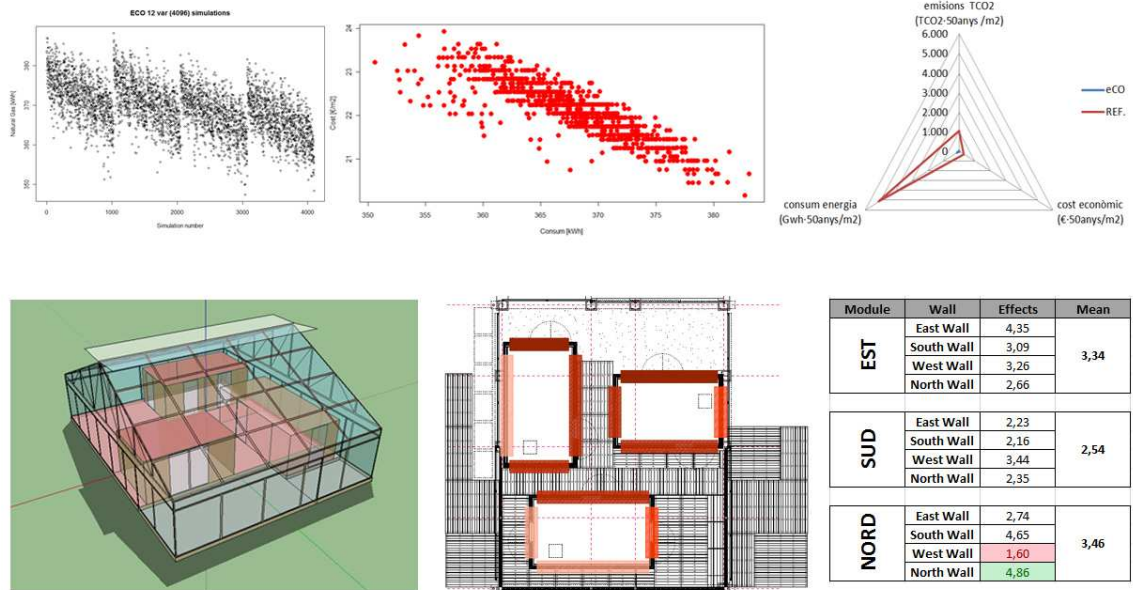


Fig. 11. Página de resultados del estudio de caso (e)CO 2012.

En la fig. 12, un diagrama muestra las emisiones de gas natural (kW / h) para cada una de los diferentes escenarios simulados. El patrón presentado por el modelo muestra claramente una estructura regular en las emisiones. En la fig. 13, podemos ver la relación entre el coste y el consumo de cada uno de los 4096 simulaciones.

ECO 12 var (4096) simulations

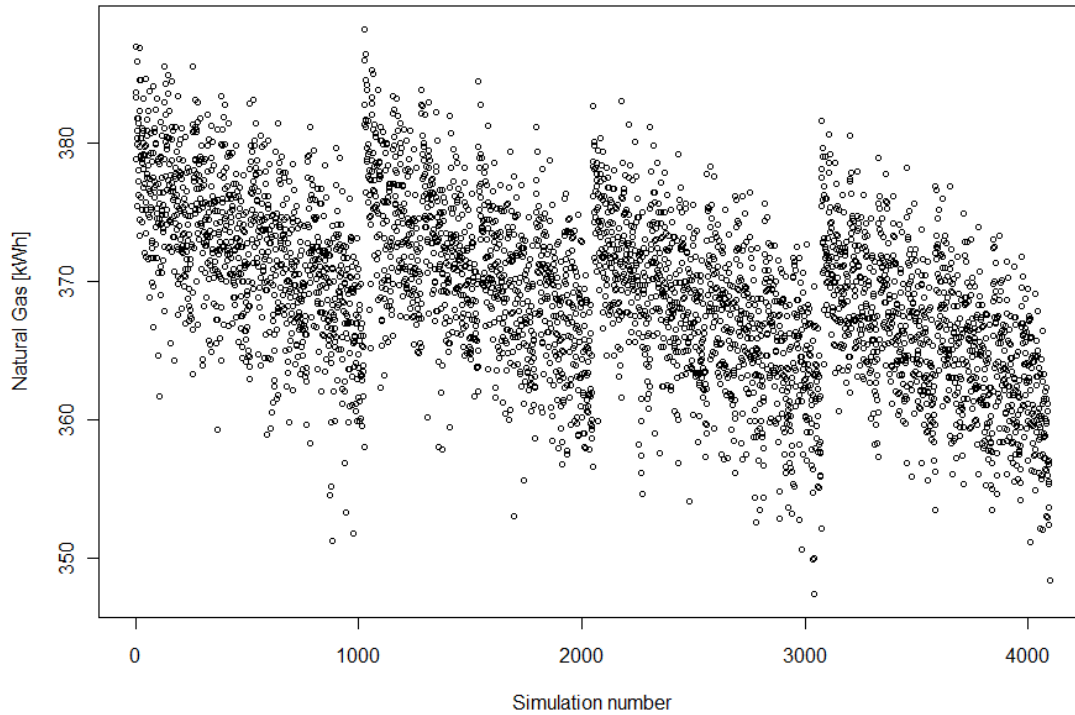


Fig. 12. Demanda (kWh) de cada simulación realizada.

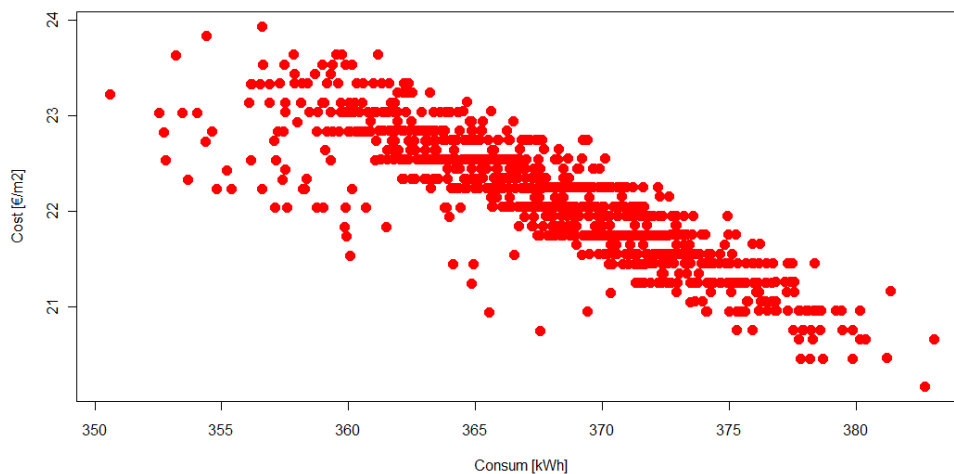


Fig. 13. Relación entre el coste y consumo de los 4096 experimentos.

Como dijimos anteriormente, se analizaron los datos utilizando el algoritmo de Yates para obtener los efectos de los factores del modelo. Se obtuvo una imagen clara de estos efectos, que están representados en la siguiente Tabla.

Tabla 2. Efectos de los factores de nuestro modelo.

Module	Wall	Effects	Mean
East	East Wall	4,35	3,34
	South Wall	3,09	
	West Wall	3,26	
	North Wall	2,66	
South	East Wall	2,23	2,54
	South Wall	2,16	
	West Wall	3,44	
	North Wall	2,35	
North	East Wall	2,74	3,46
	South Wall	2,65	
	West Wall	2,60	
	North Wall	4,86	

Ahora, claramente podemos analizar qué parámetros son los más influyentes sobre el potencial de ahorro de energía y cuyas paredes hay que prestar atención. Esto se muestra claramente en la siguiente figura.

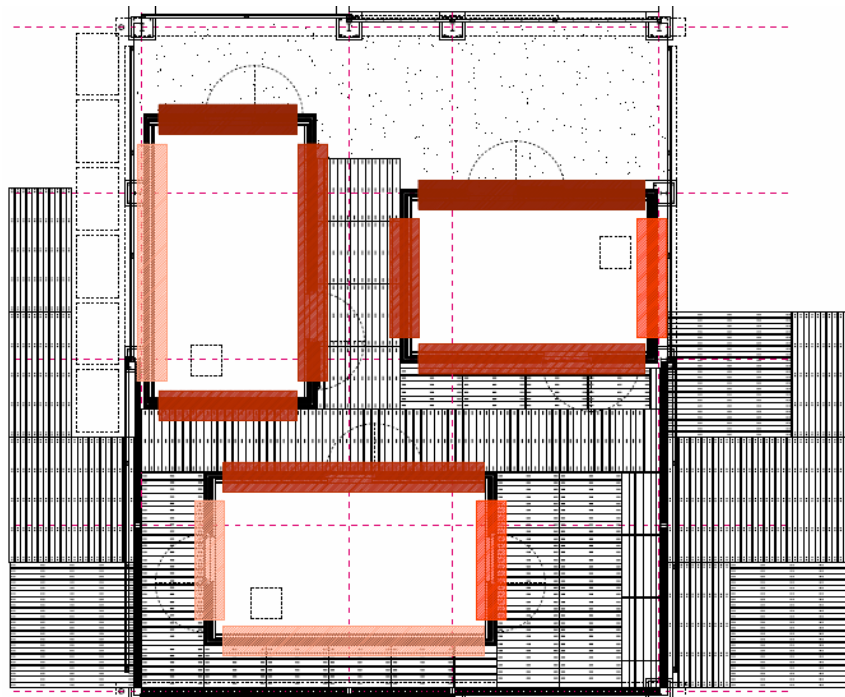


Fig. 14 Principales efectos del modelo. Las paredes marcadas en rojo oscuro representan aquellos que tienen un efecto más fuerte cuando un material de aislamiento se utiliza mejor.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un método novedoso que utiliza la co-simulación para optimizar procesos de ciclo completo en la edificación (en el caso de estudio concreto se optimiza la demanda energética del edificio (e)CO).

Los no expertos en la simulación puede entender el comportamiento dinámico del modelo como resultado de la naturaleza gráfica del lenguaje formal SDL usado para la definición del modelo. Esto significa que el equipo puede evaluar el modelo y proponer modificaciones sin tener que recurrir a lenguajes de programación complejos.

En cuanto a los resultados obtenidos, es interesante observar que no todas las paredes del edificio reaccionan de la misma manera a la modificación de los parámetros. Esto implica claramente que, para lograr una solución óptima, sería interesante plantear espesores diferentes según la orientación de cada cerramiento.

En una posterior publicación se detallarán los resultados comparativos entre la optimización realizada para la zona climática de Barcelona y Madrid, anotando a su vez el CO₂ y costo económico asociados.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] P. E. y. d. Consejo, «Directiva 2010/31/CE,» 2010.
- [2] «International Energy Agency,» [En línea]. Available: www.iea.org.
- [3] U. D. o. Energy, «EnergyPlus Energy Simulation Software,» 2012. [En línea]. Available: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_testing.cfm.
- [4] J. J. Hirsch., «DO2.com,» Electric Power Research Institute, 2012. [En línea]. Available: www.doe2.com.
- [5] W. McDonough y M. Braungart, Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things, 1 ed., North Point Press, 2002, p. 208.
- [6] L. & B. O. & R. P. & Q. D. Arantes, «A simple method to consider energy balance in the architectural design of residential buildings,» Boston, 2011.
- [7] P. & S.-A. J. Andreas Sattrup, «A methodological study of environmental simulation in architecture and engineering,» Boston, 2011.
- [8] M. & H. K. & M. K. H. Bruno, «Multi-Objective Optimization in Urban Design,» Boston, 2011.
- [9] «GenOpt,» 2011. [En línea]. Available: <http://simulationresearch.lbl.gov/GO/index.html>. [Último acceso: 01 07 2012].
- [10] N. R. E. Laboratory, «Opt-E-Plus,» U.S. Department of Energy, October 2011. [En línea]. Available: http://www.nrel.gov/buildings/energy_analysis.html.
- [11] «BEopt,» [En línea]. Available: <http://beopt.nrel.gov/>.
- [12] «The DAKOTA Project,» 2011. [En línea]. Available: <http://dakota.sandia.gov/>. [Último acceso: 01 07 2012].
- [13] B. Zeigler, H. Praehofer y D. Kim, Theory of Modeling and Simulation, Academic Press, 2000.
- [14] Telecommunication standardization sector of ITU, «Specification and Description Language (SDL),» International Telecommunication Union, 1999. [En línea]. Available: <http://www.itu.int/ITU-T/studygroups/com17/languages/index.html>. [Último acceso: April 2008].
- [15] L. Recalde, E. Teruel y E. Silva, «Autonomous continuous P/T systems. Application and Theory of Petri Nets,» Lecture Notes in Computer Science, pp. 107-126, 1999.
- [16] A. & W. G. & M. S. Sayed Ahmed, «Integrating Building Information Modeling & Cell-DEVS Simulation,» 2010.
- [17] R. & K. M. & L. L. & C. A. Gotzhein, «Energy-Aware System Design with SDL,» de SDL 2009: Design for Motes and Mobiles, Bochum, Springer, 2009.

- [18] D. B. C. & J. W. H. & M. K. & B. T. Griffith, *Contrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs*, 2005.
- [19] C. (. E. R. L. -. NREL, *BLAST 3.0*, EE.UU., 2012.
- [20] E. Universidad de Wisconsin, «TRNSYS 13.1,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.trnsys.com/>.
- [21] U. d. Strathclyde, «ESP-r,» Reino Unido, 2012. [En línea]. Available: <http://www.esru.strath.ac.uk>.
- [22] I. E. S. Limited, «IES<VE>,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.iesve.com>.
- [23] D. o. E. o. EE.UU., «EnergyPlus Energy Simulation Software. Testing and Validation,» 2012. [En línea]. Available: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_testing.cfm.
- [24] «eQuest,» 2010. [En línea]. Available: <http://doe2.com/equest/index.html>.
- [25] Design Builder Software, «DesignBuilder,» 2005. [En línea]. Available: <http://www.designbuilder.co.uk/>.
- [26] IEC International Engineering Consortium, «SDL Tutorial,» 2000. [En línea]. Available: <http://www.iec.org/online/tutorials/sdl/>. [Último acceso: January 2009].
- [27] ETSAV, «(e)co model, Solar Decathlon Prototip,» 2012. [En línea]. Available: http://www.solardecathlon.upc.edu/2012/e_dise%C3%B1o.html. [Último acceso: 01 07 2012].
- [28] E. Low3, «Low3 - Prototip model SolarDecathlon,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.low3.upc.edu/INTRO.html>.
- [29] A. D. Cadavid, «Diseño estadístico de experimentos,» Universidad de Antioquia, 2009.

7. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo de la FIB InLab de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Agradecemos las imágenes y documentación decida del caso de estudio al equipo (e)CO, grupo que diseñó el edificio prototipo para la competición Solar Decathlon.

CORRESPONDENCIA

Nombre y apellido: Antoni Fonseca i Casas

E-mail: antoni.fonseca@gmail.com

CESIÓN DE DERECHOS

Por la presente, y como autor del trabajo mencionado arriba, cedo al Congreso de Nacional del Medio Ambiente – CONAMA 2012, una licencia no-exclusiva irrevocable para imprimir, reproducir, distribuir, transmitir o comunicar de cualquier manera dicho trabajo, incluyendo el derecho de hacer modificaciones de formato. Además, afirmo que esta cesión no lesiona los derechos de terceros.