

## Optimización de la demanda de calefacción y análisis del coste del ciclo de vida de los edificios

### *Optimization of the heating demand and the life-cycle cost analysis for buildings*

Pablo Aparicio-Ruiz, José Guadix-Martín, Luis Onieva-Giménez y María Rodríguez-Palero

Grupo de Ingeniería de Organización. Escuela Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla. C/Camino de los Descubrimientos, S/N, 41092, Sevilla, España.

pabloaparicio@us.es, guadix@esi.us.es, onieva@us.es, mariarodriguez@us.es

Fecha de recepción: 4-3-2012

Fecha de aceptación: 9-10-2012

**Resumen:** El objetivo de este estudio se centra en optimizar el coste del ciclo de vida de un edificio con el menor consumo de demanda energética, centrado en la demanda de calefacción. El estudio pretende mejorar la calidad ambiental y energética en los edificios. El objetivo es establecer una metodología de optimización de la envolvente o epidermis de un edificio y de los elementos activos que la conforman, para estudiar el consumo energético y el ahorro correspondiente, considerando el impacto medioambiental y el coste de este. La aplicación de una heurística tabú permite agilizar el tiempo de resolución del problema.

**Palabras clave:** optimización, demanda calefacción, coste ciclo vida, eficiencia energética, tabú.

**Abstract:** The main contribution of the developed system is that it provides a tool for the architects to select optimal materials from an array of possibilities for different buildings elements and also to estimate the conceptual cost for the buildings element in the early stage of building design. This study focuses on optimizing the life cycle cost of a building with the lowest consumption of energy demand, focusing on heating demand, because in the buildings are affected in a greater proportion by the heating demand. The study purposes to improve environmental quality and energy in buildings. The aim is to establish a methodology for optimizing epidermal or hull a building and active elements that comprise it, to study the energy consumption and corresponding savings, considering the environmental impact and cost.

Actually, in the construction sector, builders and architects are now required to build and design homes that are validate by two programs: LIDER is a tool for the calculation of the energy demand of a building, and CALENER is a tool for the energy rating to fulfill their obligations when implementing 2002/91/CE Directive. The processes of calculation in these tools are slow, although rigorous. However, these tools are used for calculating a building with specific building materials; therefore, these tools do not help in the optimal selection of materials. Due to these tools need a lot of time to calculate, all proposals for changes that will be studied, cases will be calculated by simplified methods for the calculate of heating demand.

In addition, the methodology allows the modification of the construction elements of the epidermis, using a new and innovative process which helps decision making. This process is based on an energy model of the building, and by applying the metaheuristic Tabu Search, it is now possible select and change construction elements in a defined geometry quickly. The calculation algorithm contains a model of multi-objective optimization based on tabu search for optimizing design building elements that minimize the life cycle cost and heating demand.

The model was applied in buildings located in Madrid (Spain). There have been optimal solutions of buildings, which show marked improvements both for optimal life cycle cost, as for the minimum heating demand with initial life cycle cost. Detached house were obtained between 3% and 10% savings in heating demand, while for blocks of flats improvements were obtained between 19% and 41%, for this type, clearly is possible to reduce the energy rating. It should be noted that the simplified model is a conservative model, so we can ensure that energy rating of the corresponding buildings heating demand will be at least as indicated in the solution of our process.

**Keywords:** optimization, heating demand, life cycle cost, energy efficiency, tabu.

## 1. Introducción

Actualmente, alrededor del 40 por ciento del consumo europeo de energía se debe al sector de la construcción (EU, 2010). En la UE el consumo ener-

gético de los edificios es la mayor prioridad, por esta razón surgen diversas directivas y estándares (DOCE, 2003; CEN 2005, 2006). Para 2020 se pretende mejorar la eficiencia energética de la UE en un 20% (UE, 2007).

Los arquitectos buscan edificios que cumplan las normativas constructivas, sin embargo, estos no disponen en la actualidad de una metodología simple de diseño, que les permita de manera rápida realizar diseños que afinen las necesidades y cambios arquitectónicos para la posterior evaluación energética de los edificios. La metodología a desarrollar pretende utilizar un modelo acelerado de cálculo, como filtro inicial a las herramientas oficiales de certificación.

El análisis basado en un sistema de información o BIM (Building Information Modeling), permiten a los diseñadores evaluar las estrategias alternativas de energía y sistemas (Stumpf y Brucker, 2009). Este tipo de tecnología en creciente desarrollo no está totalmente explorada debido a la complejidad y los enormes costes que supone el modelado de la construcción (Eastman et al., 2011). Algunos autores han utilizado programas de simulación (Hong et al., 2000; Al-Homoud, 2001). Una visión general es proporcionada por Wilde y Voorden (2004).

En España, la nueva directiva 2010/31/UE establece, además de la obligatoriedad de fijar unos requisitos mínimos de eficiencia energética de los edificios, la obligatoriedad de que antes del 2021, todos los nuevos edificios tengan un consumo de energía casi nulo. Para ello será necesario determinar el correspondiente nivel de eficiencia energética. Actualmente, el sector de la construcción está obligado a usar dos herramientas: La herramienta LIDER para el cálculo de la demanda energética de un edificio y CALENER para la calificación energética de la Directiva 2002/91/CE. Las herramientas suelen ser lentas, aunque rigurosas en el cálculo. Sin embargo, no ayudan en la selección óptima de materiales, ya que son herramientas de cálculo para un edificio con unos materiales constructivos concretos.

Debido a que estas herramientas de cálculo necesitan mucho tiempo, se optará por un método simplificado de cálculo de demanda energética propuesto por Álvarez et al., 2010. Además, la metodología permitirá la modificación de los elementos constructivos de la epidermis, empleando en su conjunto un nuevo e innovador proceso de ayuda a la toma de decisiones. Este proceso se basa en un modelo energético del edificio, y mediante la aplicación de la metaheurística Búsqueda Tabú (Glover y Laguna, 1997) se agiliza la selección y variación de los elementos constructivos en una geometría definida.

Este estudio se centra en la demanda de calefacción (DC) por ser la que afecta en mayor proporción sobre los edificios. La toma de decisiones tiene que unir factores ambientales (emisiones CO<sub>2</sub>), energéticos

(demanda), financieros (inversión, costes emisiones CO<sub>2</sub> y demanda) que comprenden el coste del ciclo de vida (CCV), con el objetivo de alcanzar la mejor solución (CCV o DC-CCV) posible.

## 2. Metodología

La simulación permite la evaluación y estudio de los objetivos y aspectos de diseño previos a la construcción. Asiste en el estudio e identificación de soluciones y alternativas. Permite realizar un análisis de sensibilidad para visualizar de forma inmediata las ventajas y desventajas económicas de una modificación del proyecto, mediante la evaluación y ponderación de las alternativas respecto de los objetivos o criterios globales.

Figura 1  
Metodología del proceso de optimización



El conjunto de actividades que forman parte del proceso propuesto es (Figura 1).

1. Modelo de referencia: El arquitecto o usuario, realiza un diseño arquitectónico inicial o de referencia formado por la geometría constructiva del edificio. Se define un conjunto de variables independientes fijas debidas a la situación del edificio que generalmente son aceptadas en el código técnico de edificación (CTE).
2. Modelo simplificado: El usuario selecciona los elementos de la epidermis que pueden variar durante el análisis, para los cuales se ha incorporado una base de datos de materiales y precios. El sistema calcula con el modelo simplificado la DC y el CCV estimado para el edificio de referencia. Generándose el punto inicial del posterior análisis.

3. Análisis de sensibilidad y estudio: Se realiza un estudio de los posibles valores y se comprueban las variaciones o ajustes de los pesos de las distintas variables. Se aplica una optimización basada en la búsqueda tabú, ésta explora el espacio de soluciones tratando de evitar los óptimos locales. El análisis permite obtener una solución basada en el modelo simplificado, que mejora la DC y el CCV estimado respecto del edificio de referencia.
4. Análisis de comportamiento: Se estudia el comportamiento oficial del edificio seleccionado en base al método de certificación que verifica los valores del modelo simplificado (LIDER-CALENER).
5. Modificación del modelo: Si el modelo simplificado no coincide con la certificación, o criterio seleccionado por el usuario, se vuelve a realizar

un estudio con modificaciones del modelo inicial de referencia (vuelta al paso 2).

6. Definición final: Si el modelo es correcto y cumple con el criterio de búsqueda, finaliza el estudio del edificio. Generándose un nuevo diseño que aplica las modificaciones necesarias para la mejora del edificio de referencia.

## 2.1. Datos y variables del modelo

En los planteamientos iniciales del diseño, se mezcla la creatividad del arquitecto y las necesidades del cliente. Sin embargo, no se conoce que características tomará finalmente el proyecto, las soluciones constructivas adoptadas o los sistemas de climatización que demande el edificio. En el procedimiento de diseño se plantea diferentes conjuntos de datos, variables e índices de estudio (Tabla 1).

Tabla 1  
Parámetros, variables y datos dependientes de las variables

Tipo		Descripción
Parámetros del edificio	<i>plantas</i>	Número de plantas del edificio.
	$A_i$	Área de transferencia de un elemento <i>i</i> . Elementos: cubierta, suelo, muro y ventana de cada orientación.
	<i>altura</i>	Altura libre de los espacios (m).
	ASSE	Área solar sur equivalente (adimensional). Es la relación entre la radiación que reciben las ventanas en sus correspondientes orientaciones teniendo en cuenta las sombras propias y/o lejanas, junto con la radiación que recibirían si estuvieran orientadas al sur sin ningún tipo de sombra.
	<i>g</i>	Factor solar medio de las ventanas (adimensional).
	<i>ventilación</i>	Renovaciones hora de ventilación y/o infiltración.
	$L_i$	Longitud del puente térmico <i>i</i> .
Variables del edificio	$A_a$	Área acondicionada: Área de Suelo * N° plantas.
	$av_i$	Porcentaje de área de ventana en la orientación <i>i</i> .
	$p_i$	Permeabilidad de la ventana en la orientación <i>i</i> .
	$U_i$	Transmitancia térmica de un elemento <i>i</i> .
Valores dependientes de las Variables del edificio	$\Psi_i$	Transmitancia térmica lineal del puente térmico <i>i</i> .
	$A_t$	El área de transferencia.
	$U_m$	Transmitancia térmica media del edificio, calculada a partir de las transmitancias de los elementos de la envolvente, incluidos los puentes térmicos.
	$VIA_t$	Compacidad, es el cociente del volumen acondicionado dividido por el área de transferencia.
Parámetros Climáticos	$AVIA_a$	Área de ventanas equivalente al sur dividido por el área acondicionada.
	<i>Localidad</i>	Localidad geográfica.
	$GD$	Grados-día de invierno de la localidad en el periodo considerado.
Propiedades térmicas	$I_s$	Radiación global acumulada sobre superficie vertical con orientación sur en el periodo considerado en kWh/m <sup>2</sup> .
	$\rho$	Densidad del aire. Se toma igual a 1,2 kg/m <sup>3</sup> .
	$C_p$	Calor específico del aire a presión constante. Se toma igual a 1 kJ/kg K.

Las variables de la (Tabla 1) generan los movimientos a soluciones vecinas en la búsqueda tabú aplicada. El resto de valores se mantienen fijos en cada iteración algorítmica, excepto los valores dependientes de las variables.

## 2.2. Modelo de demanda de Calefacción

Para la estimación de la demanda anual de calefacción se ha aplicado el modelo desarrollado por (Álvarez et al., 2010). En la obtención de esta correlación se han considerado como meses de calefacción los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo, octubre, noviembre y diciembre. Se propone la ecuación 1 para el cálculo de la DC (kWh/m<sup>2</sup>):

$$DC = \left\{ \begin{array}{l} a \cdot \left( \frac{Um}{V/at} \right) \cdot (altura) \cdot GD \cdot \frac{24}{1.000} + b \cdot \left( \frac{Av}{Aa} \right) \cdot g \cdot ASSE \cdot Is \\ + c \cdot (ventilación) \cdot p \cdot Cp \cdot (altura) \cdot GD \cdot \frac{24}{3.600} + d \end{array} \right\} \quad (1)$$

siendo: *a, b, c, d* coeficientes de la ecuación

El significado de cada término de la DC es el siguiente:

- El primer término recoge la influencia del nivel de aislamiento del edificio, de su compacidad y del clima, a través de los grados-días. Tiene signo positivo porque contribuye a aumentar la DC.
- El segundo término recoge la influencia del nivel de acristalamiento del edificio, y del clima, a través de la radiación solar. Tiene signo negativo, es decir, contrario al de la DC.
- El tercer término recoge la influencia de la ventilación y/o la infiltración del edificio, y del clima, a través de los grados-días. Tiene signo positivo porque contribuye a aumentar la DC.
- En último lugar, se ha añadido un término independiente que recoge la influencia de todos los demás términos de los que depende la DC, como las fuentes internas.

## 2.3. Análisis económico

El procedimiento que describe el coste del ciclo de vida, que se presenta en la fase 2º de la (Figura 1), es el siguiente: Primero se realiza un paso previo una sola vez para cada edificio, en este paso previo se seleccionan los elementos que formarán parte de la base de datos de materiales y precios. En segundo lugar se define una situación inicial y se calcula DC,

en la cual se tomarán las construcciones del CTE-HEI y los equipos de referencia de CALENER-VYP. Una vez obtenida la DC se calculan los consumos de energía final, primaria, y emisiones de CO<sub>2</sub>, con los cuales se calcula el coste de inversión del edificio y el correspondiente CCV. Obtenida la solución inicial, se aplica el algoritmo tabú, que realiza el estudio de las demandas, consumos e inversión respecto de los datos geométricos y de las posibles alternativas aplicables al problema, basadas en la variación de las variables de la (Tabla 1).

En este estudio se presentan dos soluciones óptimas: mínima DC para inversión igual a la inicial, mínimo CCV entre las alternativas que originan ahorros.

La solución final dependerá de: los pesos relativos entre los diferentes criterios de optimización, el número de años considerados en el estudio de rentabilidad económica (40 años según la normativa europea), el coste de la energía y el tipo de interés del dinero utilizado para el cálculo del VAN y el punto inicial elegido.

Se ha planteado un procedimiento de obtención de dicho CCV óptimo, teniendo en cuenta los siguientes costes:

- Coste de inversión para la mejora de: la transmitancia térmica de los cerramientos (muros, cubiertas y suelos); la transmitancia térmica, el factor solar y la permeabilidad de ventanas; las transmitancias térmicas lineales de puentes térmicos; la permeabilidad y el control de la ventilación.
- Coste de operación debido al consumo de calefacción.
- Coste por emisiones de CO<sub>2</sub>

De esta forma, el CCV se ha calculado como la suma del coste de inversión, más el de operación, más el coste por emisiones de CO<sub>2</sub>, que se produce durante los años de vida del edificio, dada la incertidumbre en la evolución del tipo de interés del dinero y del precio del combustible usado [véase fórmula (2)].

Para el algoritmo Tabú son conocidos los precios de cada elemento constructivo, de la mejora de puentes térmicos, de las estrategias de ventilación, el coste por emisiones de CO<sub>2</sub>, y el precio de la energía.

Por su parte, el rendimiento medio estacional del sistema de calefacción, puede suponerse constante y conocido, esto permite obtener el consumo de energía final.

$$CCV (\text{€}) = Inversión + (\text{consumo}_{\text{calefacción año } l} + \text{Coste}_{\text{emisiones año } l}) \cdot Anualidad \tag{2}$$

Donde:

$$Inversión (\text{€}) = \sum_{t=1}^n (\text{precio}_{\text{Elemento}_i} \cdot \text{Area}_{\text{Elemento}_i}) + \text{Precio}_{\text{Mejora Puentes Térmicos}} * \text{Longitud}_{\text{Puentes Térmicos}} + \text{Precio}_{\text{Estrategia Ventilación}}$$

$$\text{Consumo}_{\text{total calefacción}} (\text{€/año}) = \sum_{t=1}^n (\text{Consumo}_{\text{calefacción año } t} (\text{€/año}))$$

$$\text{Coste}_{\text{total emisiones}} (\text{€/año}) = \sum_{t=1}^n (\text{Coste}_{\text{emisiones año } t} (\text{€/año}))$$

$$Anualidad(\text{años}) = \sum_{t=1}^n \frac{(1 + k_1)^t}{(1 + k)^t}$$

$$\text{Consumo}_{\text{calefacción año } t} (\text{€/año}) = \frac{\text{Demanda}_{\text{calefacción año } t} (\text{kWh/m}^2 \text{ año})}{\text{Rendimiento}_{\text{sistema calefacción}}} \cdot \text{Precio}_{\text{energía año } t} (\text{€/kWh})$$

### 3. Resultados

Las tipologías edificatorias usadas para las comparaciones han sido 7 edificios típicos de la edificación residencial (Figura 2).

Las características constructivas base son las correspondientes a edificio de referencia de la sección HEI del CTE. Las condiciones climáticas usadas en estos ejemplos son las correspondientes a las zonas climáticas de Madrid que CALENER toma por defecto.

En la (Tabla 2) se presenta la situación inicial, el resultado de aplicar los criterios de optimización para minimizar el CCV y para minimizar la DC con un CCV no superior al inicial.

Para los edificios unifamiliares se han obtenido entre 3% y 10% de ahorro en DC, mientras que para los bloques se han obtenido mejoras de entre 19% y 41%. Para estos últimos se logra reducir claramente

Figura 2  
Tipologías de edificación básicas aplicadas

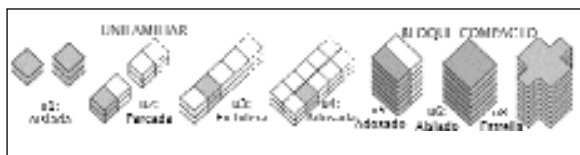


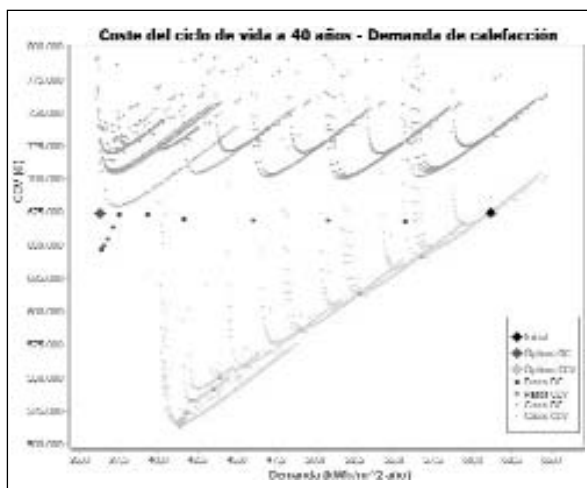
Tabla 2  
Batería de resultados

T	Plantas	Inicial			Óptimo CCV				Mínima DC con CCV inicial			
		CCV	DC	CE	CCV	DC	Dif.	CE	CCV	DC	Dif.	CE
u1	1	174178.0	446.7	E	163388.4	411.5	-8%	E	174139.4	400.7	-10%	E
u2	2	170133.8	431.8	E	160977.2	405.5	-6%	E	169912.6	398.3	-8%	E
u3	2	164741.1	425.8	E	158291.9	406.7	-4%	E	164741.1	400.9	-6%	E
u4	2	158554.9	418.1	E	154422.1	404.6	-3%	E	158507.2	400.2	-4%	E
b5	6	599515.1	54.8	C	486792.1	41.1	-25%	C	597327.0	37.4	-32%	C
b6	4	487871.9	69.4	D	402922.1	53.3	-23%	C	487620.3	49.0	-29%	C
b6	4	492702.1	68.1	D	408592.2	52.7	-23%	C	491544.8	48.5	-29%	C
b6	4	456691.3	67.5	D	391316.8	54.8	-19%	C	456431.6	51.3	-24%	C
b8	6	674334.5	61.1	D	515399.7	41.3	-32%	C	673823.4	36.2	-41%	B
b6	6	674357.6	61.1	D	515421.7	41.4	-32%	C	673845.4	36.2	-41%	B

T: Tipología de edificio (Figura 2); Plantas: Numero de plantas del edificio; CCV: Coste del ciclo de vida en €; DC: Demanda de Calefacción en kWh/m2año; Dif: Diferencial de DC entre el inicial y el resultado del algoritmo; CE: Letra de la calificación energética del edificio por emisiones debidas a la calefacción.

la calificación energética. Se debe tener en cuenta que el modelo simplificado es un modelo conservador, por lo que podemos asegurar que la calificación energética (CE) de los edificios correspondiente a la demanda de calefacción será al menos la indicada en la (Tabla 2).

Figura 3  
Resultado del edificio tipología b6 con 6 plantas



En la (Figura 3) se representa cada paso del algoritmo Tabú, con todas sus iteraciones, seleccionando el mejor punto según el criterio seleccionado. Actualmente, el tiempo medio de resolución del algoritmo es de 5.5sg. (PC: Intel C2D E7400; 2.8Ghz; 4GB Ram), el tiempo de resolución dependerá del tamaño de las bases de datos de materiales y precios con las que se cuenta para el estudio.

#### 4. Conclusiones

En este estudio, se ha aplicado un modelo de optimización multi-objetivo basado en la búsqueda tabú, para el diseño de edificios optimizando los elementos constructivos que minimicen los CCV y la DC. El modelo se aplicó en edificios ubicados en Madrid (España). Se han presentado las soluciones óptimas de los edificios, que muestran mejoras notables tanto para el óptimo CCV como para la óptima DC con el CCV inicial. Sería interesante como trabajo futuro optimizar el conjunto de demandas de refrigeración y calefacción para encontrar diseños óptimos de la envolvente de los edificios.

#### Referencias

- AL-HOMOUD, M. S. (2001). «Computer-aided building energy analysis techniques». *Building and Environment*, 36 (4), pp. 421-433.
- ÁLVAREZ, S., SALMERÓN, J. M., MOLINA, J. L., y SÁNCHEZ, F. J. (2010). «Calculation Methods As a Barrier for the Penetration of Passive Cooling». *Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment* (Palenc-Epic), (3), pp. 1-13.
- CEN EN 15217:2005 (2005). «Energy Performance of Buildings. Methods for Expressing Energy Performance and for Energy Certification of Buildings». Comité Européen de Normalisation.
- CEN EN 15251:2006 (2006). «Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings. Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics». Comité Européen de Normalisation.
- DOCE-DIARIO OFICIAL DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS (2003). «Directiva 2002/91/ce del parlamento europeo y del consejo de 16/12/2002 relativa a la eficiencia energética de los edificios».
- EASTMAN, C., TEICHOLZ, P., SACKS, R., y LISTON, K. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*.
- UE (2007). «Comunicación de la Comisión, de 10 de enero de 2007, "Limitar el calentamiento mundial a 2 °C - Medidas necesarias hasta 2020 y después"».
- EU (2010) «Directive 2010/31/EU of the European parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings».
- GLOVER, F., y LAGUNA, M. (1997). *TabuSearch*. Kluwer Academic Publishers.
- HONG, T., CHOU, S.K., y BONG, T.Y. (2000). «Building simulation: An overview of developments and information sources». *Building and Environment*, 35 (4), pp. 347-361.
- WILDE, P., y VAN DERVOORDEN, M. (2004). «Providing computational support for the selection of energy saving building components». *Energy and Buildings*, 36 (8), pp. 749-758.
- STUMPF, A., y BRUCK, B. (2009). «Enables Early Design BIM Energy Analysis», en [www.cecer.army.mil/td/tips/docs/BIM-EnergyAnalysis.pdf](http://www.cecer.army.mil/td/tips/docs/BIM-EnergyAnalysis.pdf).