

## 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

Aparicio Ruiz P<sup>1</sup>, Guadix Martín J<sup>1</sup>, Onieva Giménez L<sup>1</sup>, Rodríguez Palero M<sup>1</sup>

**Abstract (English)** The aim of this study focuses on optimizing the life cycle cost of a building with the lowest consumption of energy demand, focusing on heating demand. The study aims 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. The Tabu Search heuristics speeding up problem resolution.

**Resumen (Castellano)** El objetivo de este estudio se centra en optimizar el coste del ciclo de vida (CCV) de un edificio con el menor consumo de demanda energética, centrado en la demanda de calefacción (DC). 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.

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

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

---

<sup>1</sup> Pablo Aparicio Ruiz (✉), José Guadix Martín, Luis Onieva Giménez, María Rodríguez Palero  
Grupo de Ingeniería de Organización. Escuela Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla,  
C/Camino de los Descubrimientos, S/N 41092 Sevilla, Spain.  
e-mail: [pabloaparicio@us.es](mailto:pabloaparicio@us.es), [guadix@esi.us.es](mailto:guadix@esi.us.es), [onieva@us.es](mailto:onieva@us.es), [mariarodriguez@us.es](mailto:mariarodriguez@us.es)

## 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 energético 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 y Charles, 2008). Algunos autores han utilizado programas de simulación (Hong et al., 2000; Homoud, 2001). Una visión general es proporcionada por Wilde y Voorden (2004). En este estudio se establece para el cálculo inicial un programa como herramienta para el cálculo de la demanda energética de un edificio (LIDER) y otro para la Calificación Energética (CALENER) en la aplicación de la Directiva 2002/91/CE. El proceso de cálculo con estas herramientas suele ser lento, aunque riguroso. Sin embargo la aplicación de la metaheurísticas Búsqueda Tabú (Glover y Laguna, 1997) y de modelos simplificados (Álvarez et al., 2010) permite agilizar el análisis. Este estudio se centra en la 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 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.

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

1. Modelo de referencia: El arquitecto o diseñador (usuario), realiza un modelo de referencia (inicial) en base al conjunto de variables independientes fijas debidas a la situación del edificio que generalmente son aceptados en el código técnico de edificación (CTE).
2. Modelo simplificado: Éste calcula la DC y el CCV estimado para el edificio de referencia. El usuario selecciona los elementos de la epidermis que pueden variar en el análisis y la información de la base de datos de materiales y precios.
3. Análisis de sensibilidad y estudio: Se realiza un estudio de los posibles valores y se comprueban las variaciones o cambios leves en el modelo. Se aplica una optimización basada en la búsqueda tabú, ésta explora el espacio de soluciones tratando de evitar los óptimos locales.
4. Análisis de comportamiento: Se estudia el comportamiento oficial (LIDER-CALENER) del edificio seleccionado en base al método de certificación que verifica los valores del modelo simplificado.
5. Modificación del modelo: Si el modelo simplificado no coincide con la certificación, 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, finaliza el estudio del edificio.

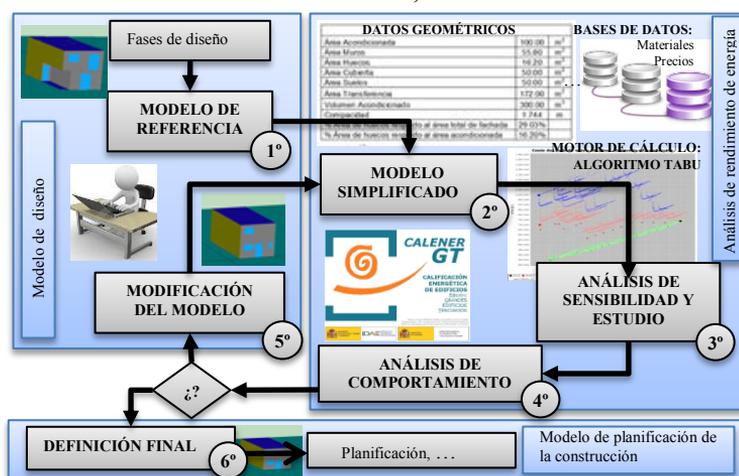


Fig. 1 Metodología del proceso de optimización

## 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
<b>Parámetros del edificio</b>	<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).
	<i>ASSE</i>	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> .
	<i>Aa</i>	Área acondicionada: Área de Suelo * N° plantas.
<b>Variables del edificio</b>	$av_i$	Porcentaje de área de ventana en la orientación <i>i</i> .
	$p_i$	Permeabilidad de la ventana en la orientación <i>i</i> .
	$U_i$	Tramitancia térmica de un elemento <i>i</i> .
	$\Psi_i$	Transmitancia térmica lineal del puente térmico <i>i</i> .
<b>Valores dependientes de las Variables del edificio</b>	$A_t$	El área de transferencia.
	$Um$	Transmitancia térmica media del edificio, calculada a partir de las transmitancias de los elementos de la envolvente, incluidos los puentes térmicos.
	$V/A_t$	Compacidad, es el cociente del volumen acondicionado dividido por el área de transferencia.
	$Av/Aa$	Área de ventanas equivalente al sur dividido por el área acondicionada.
<b>Parámetros Climáticos</b>	<i>Localidad</i>	Localidad geográfica.
	<i>GD</i>	Grados- día de invierno de la localidad en el periodo considerado.
	<i>Is</i>	Radiación global acumulada sobre superficie vertical con orientación sur en el periodo considerado en kWh/m <sup>2</sup> .
<b>Propiedades térmicas</b>	$\rho$	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>):

$$DC = \left\{ \begin{array}{l} a \cdot \left( \frac{Um}{V/At} \right) \cdot (altura) \cdot GD \cdot \frac{24}{1000} + b \cdot \left( \frac{Av}{Aa} \right) \cdot g \cdot ASSE \cdot Is + \\ + c \cdot (ventilación) \cdot \rho \cdot Cp \cdot (altura) \cdot GD \cdot \frac{24}{3600} + d \end{array} \right\} \quad (1)$$

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 (Fig. 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-HE1 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.

$$CCV(\text{€}) = \text{Inversión} + (\text{Consumo}_{\text{calefacción año } 1} + \text{Coste}_{\text{emisiones año } 1}) \cdot \text{Anualidad} \quad (2)$$

Donde:

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

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

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

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

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

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.

### 3 Resultados

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

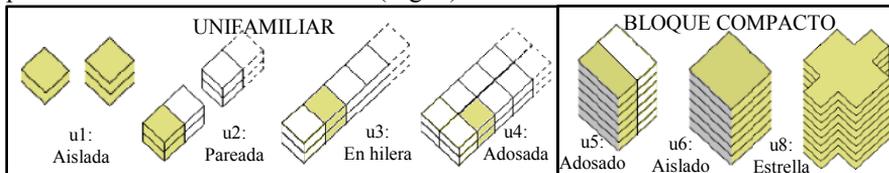


Fig. 2 Tipologías de edificación básicas aplicadas

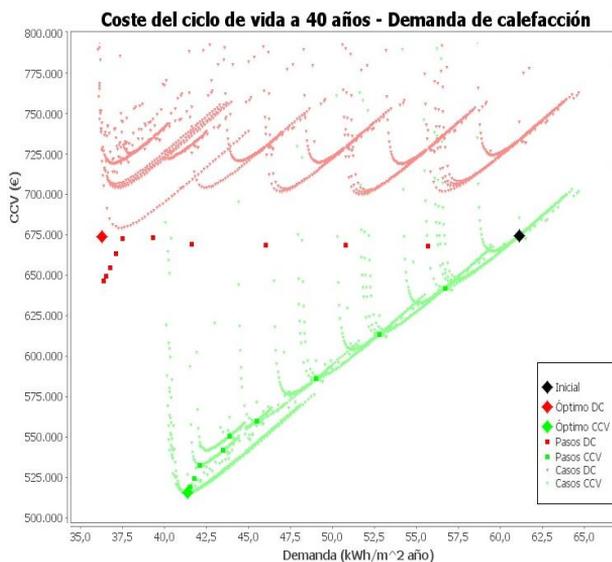
Las características constructivas base son las correspondientes a edificio de referencia de la sección HE1 del CTE. Las condiciones climáticas usadas en estos ejemplos son las correspondientes a las zonas climáticas de Madrid que CALENER toma por defecto. En la (Tabla 2) se presenta la situación inicial, el resultado de aplicar los criterios de optimización para minimizar el CCV y para minimizar la DC con un CCV no superior al inicial.

**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 (Fig. 2); Plantas: Numero de plantas del edificio; CCV: Coste del ciclo de vida en €; DC: Demanda de Calefacción en kWh/m<sup>2</sup>año; 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.

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 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 se-



**Fig. 3** Resultado del edificio tipología b6 con 6 plantas.

rá al menos la indicada en la (Tabla 2).

En la (Fig. 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 cuente 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.

## 5 Referencias

- Álvarez S., Salmerón J.M., Molina J.L., 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)*;3:1-13
- 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, Charles M (2008) BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors. Wiley
- 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, Laguna M (1997) TabuSearch, Kluwer Academic Publishers.
- Hong T, Chou SK, Bong TY (2000) Building simulation: An overview of developments and information sources. *Building and Environment*;35(4):347-361
- Homoud-AI MS (2001) Computer-aided building energy analysis techniques. *Building and Environment*, vol. 36, no. 4, pp. 421-433
- Wilde P, van der Voorden M (2004) Providing computational support for the selection of energy saving building components. *Energy and Buildings*;36(8):749-758.
- Stumpf A, Bruck B (2009) Enables Early Design BIM Energy Analysis